

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra Elektroniky**

**Realizace laboratorní úlohy z Elektrických pohonů**

Realisation of Laboratory Task for Electrical Drives

2012/2013

Bronislav Blaha

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Bronislav Blaha**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika  
Téma: Realizace laboratorní úlohy z Elektrických pohonů  
Realisation of Laboratory Task for Electrical Drives

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor – řízení otáček DC motoru s permanentními magnety napájeného z jednovadrantového pulzního měniče
2. Na základě pokynů vedoucího bakalářské práce navrhnete laboratorní úlohu z předmětu Elektrické pohony
3. Úlohu realizujete a vypracujete metodické postupy pro měření
4. Z realizovaných měření vypracujete vzorový protokol

Seznam doporučené odborné literatury:


Dle pokynů vedoucího závěrečné práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Sládeček, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry

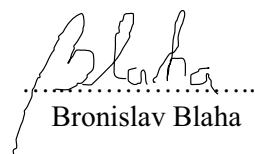


prof. RNDr. Václav Šnášel, CSc.  
děkan fakulty

**Prohlášení studenta:**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ratíškovicích ..... 7.5.2013

  
Bronislav Blaha

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji především panu Ing. Václavu Sládečkovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace a odbornou pomoc při přípravě mé bakalářské práce.

Mé poděkování patří rovněž mojí rodině za jejich podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá řízením otáček DC motoru s permanentními magnety napájeného z jednokvadrantového pulzního měniče. Cílem práce je návrh a konstrukce samotného zařízení, které je sestaveno ze dvou DC motorů. Motory jsou přes hřídel spojeny pomocí mechanické spojky. Druhý motor slouží jako zatěžovací. Na svorky motoru je tedy možné připojit zátěž. Jednokvadrantový pulzní měnič je řešen pomocí výkonového tranzistoru MOSFET. Jeho řízení zajišťuje pulzně šířková modulace, která je realizována pomocí IO 555 v astabilním zapojení. Na zatěžovací motor je připojeno tachodynamo, které slouží k měření otáček. Pohon je nejprve nasimulován v interaktivním prostředí MATLAB SIMULINK. Výsledkem práce je laboratorní zařízení pro řízení otáček motoru a měření jeho charakteristik.

## **Abstract**

The thesis deals with a control of a DC motor speed with permanent magnets powered by single-quadrant pulse converter. The aim of the thesis is a draft and a construction of the device itself, which is constructed from two DC motors. The motors are connected through a shaft with the help of the mechanical connector. The second motor then serves as a loading motor. It is possible to connect a load to the motor clamps. The single-quadrant pulse converter is arranged with the help of the efficient transistor MOSFET. Its control ensures the pulse width modulation, which is realized with the help of IO 555 in an astable connection. There is a dynamo connected to the load motor, which serves to the speed measurement. At first, the device is realized in the interactive environment MATLAB SIMULINK. The result of the thesis is a laboratory device for control of motor speed and measuring its characteristics.

## **Klíčová slova**

elektromotor, pohon, pulzně šířková modulace, jednokvadrantový pulzní měnič, tranzistor

## **Keywords**

electric motor, drive, pulse width modulation, single-quadrant pulse converter, transistor

# OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ .....	8
SEZNAM ZKRATEK.....	9
1 ÚVOD .....	10
2 ELEKTROMOTORY .....	11
2.1 Střídavé elektromotory .....	11
2.1.1 Asynchronní (indukční) motory .....	11
2.1.1.1 Asynchronní motor s kotvou nakrátko .....	13
2.1.1.2 Asynchronní motor s kroužkovou kotvou .....	15
2.1.2 Synchronní motory .....	15
2.2 Stejnoseměrné elektromotory .....	17
2.2.1 Derivační motory .....	19
2.2.2 Sériové motory .....	19
2.2.3 Kompaundní motory .....	19
2.2.4 Motory s cizím buzením .....	20
2.2.4.1 Motor s permanentními magnety .....	20
3 ŘÍZENÍ OTÁČEK MOTORU .....	22
3.1 Pulzně šířková modulace PWM .....	23
3.2 Výkonové spínací prvky .....	25
3.2.1 Bipolární tranzistory .....	25
3.2.2 Unipolární tranzistory .....	27
3.2.3 IGBT tranzistory .....	28
4 SIMULACE POHONU V MATLAB SIMULINK .....	29
4.1 Jednokvadrantový pulzní měnič .....	29
4.2 Matematický model stejnosměrného motoru .....	31

4.3	Kompletní model Pohonu .....	35
5	REALIZACE POHONU .....	37
5.1	Realizace pulzního měniče .....	38
5.1.1	Navržení chladiče.....	39
5.2	Realizace desky plošných spojů v Eaglu .....	41
6	MĚŘENÍ NA POHONU .....	42
6.1	Měření naprázdno.....	43
6.2	Měření při připojení elektrické zátěže .....	45
6.3	Měření při připojení odporové zátěže .....	46
	ZÁVĚR .....	48
	LITERATURA.....	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	51
	SEZNAM TABULEK.....	52
	PŘÍLOHY.....	52

## Seznam symbolů

Veličina	Rozměr	Popis
c		konstrukční konstanta stroje
Cu		měď
CΦ		konstanta motoru
E <sub>off</sub>	J	ztráta energie při vypínání
E <sub>on</sub>	J	ztráta energie při spínání
F		operátorový přenos
f <sub>g</sub>	Hz	pracovní frekvence spínače
f <sub>s</sub>	Hz	frekvence napájecího proudu sítě
h	m	výška
I <sub>a</sub>	A	proud protékající kotevním obvodem
I <sub>aD</sub>	A	proud na zátěži
I <sub>s</sub>	A	rozběhový proud motoru s permanentními magnety
J	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti
K		zesílení
L <sub>a</sub>	H	indukčnost kotvy
M <sub>M</sub>	Nm	mechanický moment na hřídeli motoru
n	$ot \cdot m^{-1}$	otáčky za minutu
n <sub>0s</sub>	$ot \cdot m^{-1}$	synchronní otáčky magnetického pole motoru
n <sub>s</sub>	$ot \cdot m^{-1}$	synchronní otáčky motoru
p		počet pólů
P <sub>ce</sub>	W	ztráta na hlavním proudovém obvodu pol. součástky
P <sub>g</sub>	W	ztráta řídicí elektrody
P <sub>TOT</sub>	W	celková ztráta polovodičové součástky
r	m	průměr
R <sub>a</sub>	Ω	odpor kotvy
R <sub>an</sub>	Ω	odpor kotvy při teplotě 20 °C
R <sub>DS(on)</sub>	Ω	vnitřní odpor součástky
R <sub>thC-H</sub>	Ω	tepelný odpor mezi základnou a chladičem
R <sub>thH-A</sub>	K/W	tepelný odpor chladiče
R <sub>thJ-C</sub>	K/W	tepelný odpor mezi přechodem a základnou součástky
R <sub>Z</sub>	Ω	zátěž
s	%	diference v otáčkách-skluz
T	s	perioda
t <sub>f</sub>	s	ideální doba poklesu proudu
t <sub>r</sub>	s	ideální doba nárůstu proudu



$U_a$	V	napětí kotvy
$U_{aD}$	V	napětí na zátěži
$U_d$	V	napájecí napětí měniče
$U_i$	V	indukované napětí
$U_p$	V	napětí pily
$U_{PM}$	V	pulzně modulované napětí
$U_{pmax}$	V	maximální napětí
$U_r$	V	řídící napětí
$U_s$	V	střední hodnota
$U_t$	V	napětí tachodynama
$V$	$m^3$	objem
$\delta_a$	$^{\circ}C$	teplota okolí
$\delta_C$	$^{\circ}C$	teplota základny součástky
$\delta_h$	$^{\circ}C$	teplota chladiče
$\delta_{j\ max}$	$^{\circ}C$	maximální teplota
$\tau_{ac}$	s	elektrická časová konstanta
$\tau_m$	s	mechanická konstanta motoru
$\Phi$	Wb	magnetický tok
$\omega$	$rad \cdot s^{-1}$	úhlová rychlost
$\rho$	$kg \cdot m^3$	hustota

## Seznam zkratek

Zkratka	Popis
AM	asynchronní motor
DC	stejnoseměrný motor
PWM	pulzně šířková modulace

# 1 Úvod

V dnešní době se s elektromotory setkáváme téměř všude kolem nás. Elektromotory se běžně vyskytují v téměř každé domácnosti a to většinou v podobě různých domácích spotřebičů jako jsou například kávovary, mixéry a mnohé další přístroje, jejichž součástí jsou elektromotorky s výkonem několika wattů. Elektromotory ovšem nachází uplatnění také ve zdravotnictví, kde jsou běžnou součástí různých nástrojů a přístrojů. Motory o velkých výkonech se využívají především v dopravě a to zejména v železniční, automobilové, letecké. Dále se využívají v lodním průmyslu, průmyslových strojích, automatizaci a kybernetice. Z historického hlediska první laboratorní elektromotor sestrojil britský fyzik a chemik Michael Faraday, avšak historicky první provozu schopný motor sestrojil pruský inženýr a fyzik Moritz von Jacob. Veřejnosti byl tento motor představen v roce 1834.

Obecně lze konstatovat, že motor jako takový připojený k síti, nebo ke zdroji napájení, by byl téměř ve všech aplikacích nepoužitelný, kdybychom nemohli řídit jeho otáčky. Proto je motor a obvod regulace otáček téměř nerozlučnou dvojicí. Takovouto soustavu nazýváme elektrický pohon. Tato bakalářská práce se nejprve zabývá základními typy elektromotorů, jejich rozdělením, vlastnostmi, výhodami a nevýhodami. V další kapitole jsou rozebrány možné způsoby řízení stejnosměrných motorů s permanentními magnety. Podrobně je rozebrán způsob řízení, který je použit při praktické realizaci pohonu. Druhá část bakalářské práce se již věnuje samostatné konstrukci pohonu. Kde je nejprve provedena analýza a simulace pohonu v interaktivním programovém prostředí MATLAB. Následně je uveden způsob realizace a zkonstruování pohonu. V poslední kapitole se práce zabývá měřením na zhotoveném zařízení a vyhodnocením výsledků měření. [1]

## 2 Elektromotory

Elektromotor je elektrický stroj, který má tu vlastnost, že přeměňuje elektrickou energii na mechanickou práci. Jedná se o točivý stroj, ale můžeme se setkat i s výjimkami v podobě lineárních elektromotorů. Každý elektromotor by měl obsahovat identifikační označení s údaji o výrobcí, typu motoru, jmenovité hodnoty napětí, proudu, výkonu a otáček. Na vstupních svorkách motoru je příkon a na výstupu je kvůli ztrátám výkon. Ztráty motoru lze rozdělit do pěti hlavních oblastí. První oblast jsou ztráty mechanické, které vznikají třením v ložiskách. Další ztráty jsou v železe, a dělíme je na ztráty hysterezní a na ztráty vířivými proudy. Hysterezní ztráty vznikají při přemagnetizování železa. Ztráty vířivými proudy vznikají v době, kdy magnetické pole indukuje elektrické napětí v železném jádře. Další ztráty jsou ve vinutí statoru a rotoru. Tyto ztráty jsou dány ohmickým odporem ve vinutí. Posledními jsou ztráty přídavné, které jsou většinou vířivého charakteru. Velikost ztrát v elektromotoru nám určuje účinnost  $\eta$ . Je to poměr mezi výkonem a příkonem a udává se v procentech. Účinnost je vždy menší než 100 %. Pokud by byla účinnost rovna 100 %, nebo větší jednalo by se o Perpetuum mobile. Moderní pohony dosahují účinnosti až 95 %. Existují také normy stanoveny Evropskou unií, které určují třídu účinnosti motoru. [1] [2]

### 2.1 Střídavé elektromotory

Tyto motory můžeme rozdělit z konstrukčního hlediska do několika skupin. Podle počtu fází napájecího napětí je dělíme na motory jednofázové a třífázové, existují však výjimky dvoufázových a vícefázových motorů. Podle závislosti na frekvenci  $f$  napájecího střídavého napětí a počtu otáček  $n$  je rozdělujeme na synchronní a asynchronní. Trendem dnešní doby je přechod od stejnosměrných motorů k motorům střídavým. Důvodem jsou lepší vlastnosti stroje. Velkou výhodou je, že nemají komutátor, který je u stejnosměrných motorů častým zdrojem závad. Další výhody jsou rozměry motoru, velká životnost, velká spolehlivost, malé nároky na údržbu stroje, velké obvodové rychlosti, možnost konstruovat motory o výkonu až stovky MW, velká proudová přetížitelnost. S vývojem výkonové elektroniky a mikroprocesorových systémů mizí jejich největší nevýhoda, která spočívala ve složitém a drahém řízení. [1] [2]

#### 2.1.1 Asynchronní (indukční) motory

Jedná se o nejrozšířenější elektromotor v elektronice. Je to točivý stroj, jehož princip je založen na indukci napětí a proudů v rotoru, a proto se také nazývá indukčním motorem. Magnetické točivé pole se u AM vytváří ve vinutí statoru. Toto zapojení je nejčastěji provedeno jako trojfázové, kde jednotlivé fáze jsou posunuty o  $120^\circ$  a protéká jimi trojfázový harmonický proud. Proudů procházejí závitů a vytvářejí magnetické pole s jedním severním a jižním pólem, jedná se tedy o dvojpólový stroj. Výsledné magnetické pole je vektorový součet polí všech tří fází. Otáčky takového pole se nazývají synchronní, protože závisejí přímo na kmitočtu napájecího proudu. Změna směru otáčení se u AM provádí přehozením libovolných dvou fází. Každý AM motor má na rotoru menší otáčky, než jsou otáčky

točivého magnetického pole ve statoru. Čím větší zátěž na motor připojíme, tím větší difference v otáčkách nastane. Tomuto jevu říkáme skluz:

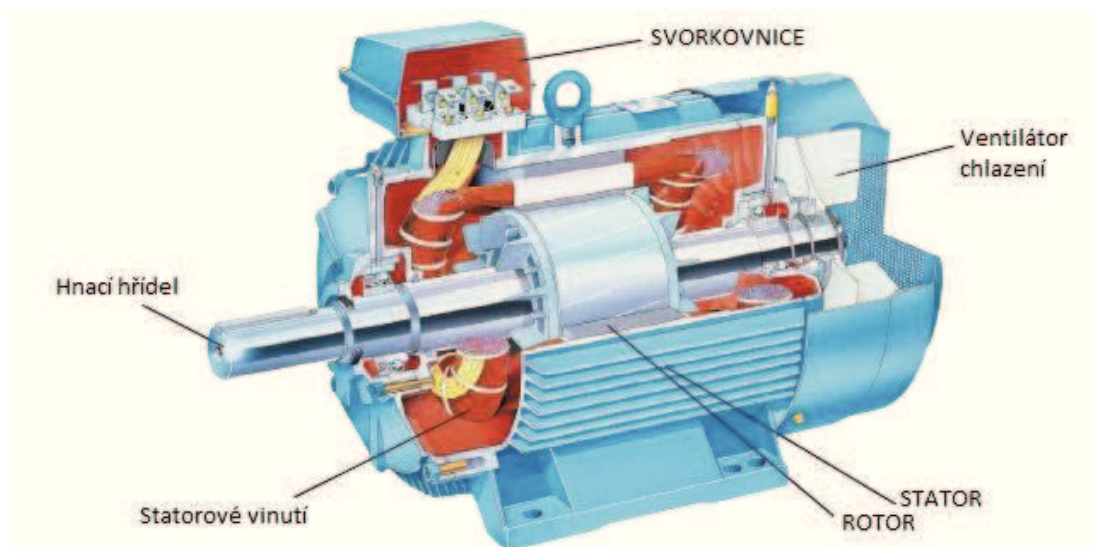
$$s = \frac{(n_{0s} - n_s)}{n_{0s}} \quad (-; \text{ot} \cdot \text{m}^{-1}, \text{ot} \cdot \text{m}^{-1})$$

Kde  $n_{0s}$  jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole a  $n_s$  jsou otáčky rotoru.

Definice skluzu vyjádřená v procentech:

$$s = \frac{(n_{0s} - n_s)}{n_{0s}} \times 100 \quad (-; \text{ot} \cdot \text{m}^{-1}, \text{ot} \cdot \text{m}^{-1})$$

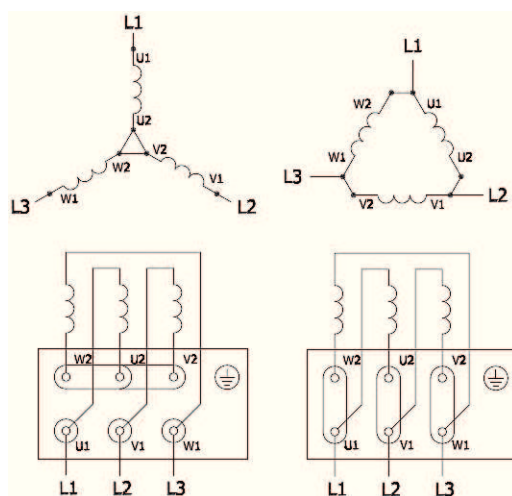
Skluz se uvádí v procentech a průměrná hodnota je kolem 5% (běžně v rozsahu 3% - 8%). Motory o velkých výkonech mají skluz menší než motory o malých výkonech. AM je jednoduchý, vysoce spolehlivý a nenáročný na údržbu. Má široký rozsah použití z výkonového hlediska od jednotek několika wattů až po MW, s velmi širokým rozsahem otáček od několika desítek otáček za minutu, až po 100 000. Lze je rozdělit z hlediska statorového vinutí na trojfázové a jednofázové a z hlediska rotorového vinutí jsou to motory na krátko a kroužkové. [3]



*Obrázek 1 Asynchronní indukční motor (upraveno autorem) [4]*

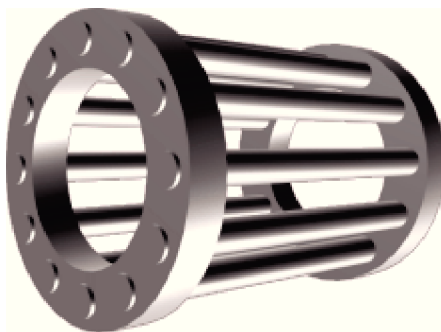
### 2.1.1.1 Asynchronní motor s kotvou nakrátko

Z konstrukčního hlediska a požadavku na funkci motoru se vyrábí jako jednofázový nebo třífázový. Hlavní části motoru s kotvou nakrátko jsou: statorový svazek, statorové vynutí, kostra, rotor s klecí, ložiska, ložiskové štitky, ventilátor a statorová svorkovnice. Plášť statoru je z lité oceli, ve kterém je magnetický obvod z plechů. Z vnitřní strany statoru jsou do plechů strojově vystříhány drážky, do kterých se ukládá vinutí, jejichž začátek je posunut o  $120^\circ$ . Začátek a konec statoru je vyveden na svorkovnici, kde se statorové vinutí zapojuje do hvězdy a to tak, že spojíme-li všechny tři konce vinutí. Druhá možnost zapojení je do trojúhelníku, které se provádí spojením konce prvního vinutí se začátkem následujícího vinutí. Typy AM jsou z konstrukčního provedení stejné, motory se od sebe liší pouze provedením rotoru.



Obrázek 2 Zapojení AM do hvězdy a trojúhelníka [5]

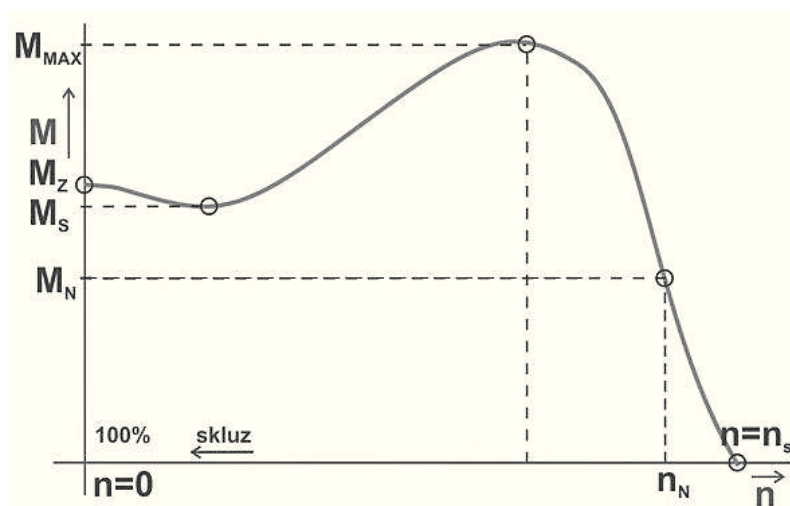
Rotor má konstruované vinutí z tyčí, které jsou neizolované a vloženy do drážek rotoru. Tyto tyče jsou pro zlepšení záběrného momentu a snížení hluku zešíkmeny. Tyče se spojují na obou dvou stranách vodivými kruhy nakrátko, vinutí tvoří klec. Toto vinutí se vyrábí z hliníku litého pod tlakem. Lopatky ventilátoru se odvíjí a tvoří s klecí jeden celek. [6]



Obrázek 3 Rotorová klec [7]

### Momentová charakteristika asynchronního motoru:

Momentová charakteristika nám určuje závislost momentu  $M$  na otáčkách  $n$  v daném bodě charakteristiky. Moment  $M$  musí být v jakémkoliv bodě charakteristiky větší než moment stroje, který pohání.



Obrázek 4 průběh momentu  $M$  s kotvou na krátko [8]

- **$M_Z$  – záběrný moment**

Je to moment, který vyvine motor při připojení k síti z klidového stavu, aby uvedl stroj do pohybu. V klidu má motor skluz  $s = 100\%$  a otáčky  $n = 0 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při rozběhu je klec v klidu a chová se jako indukčnost, má převážně jalový charakter, činný proud je malý a tudíž má malý záběrný moment.

- **$M_S$  – sedlový moment**

Při zvyšování otáček se moment začne snižovat, až po bod sedlového momentu. Je to nejmenší moment motoru po rozběhu. Momentová charakteristika nesmí ležet nad tímto bodem, motor by nepřekonal  $M_S$  a nedosáhl jmenovitých otáček.

- **$M_{MAX}$  – Maximální moment**

Po dosažení momentu sedla zvyšováním otáček se zvyšuje i moment, který dosáhne svého maxima  $M_{MAX}$ .

- **$M_N$  – jmenovitý moment**

Po dosažení  $M_{MAX}$  moment klesá na hodnotu  $M_N$ . Je to moment, který působí na hřídeli motoru při jmenovitém výkonu. V okolí  $M_N$  kolísají otáčky v závislosti na změnách jen málo. Tímto dosáhneme stálých otáček i při velkých změnách zatížení. Motor bez zátěže má téměř synchronní otáčky. [8]

### 2.1.1.2 Asynchronní motor s kroužkovou kotvou

Provedení motoru je obdobné jako u AM s kotvou nakrátko. Rotor se tedy otáčí využitím kruhového elektromagnetického pole, které v motoru vytvoří statorové vinutí. Motory se používají pro těžké rozběhy, kde požadujeme velký záběrný moment, tedy kde je velký setrvačný moment s nejtěžším rozběhem, a dále pro speciální pohony, jako jsou např. jeřáby. Rotor má trojfázové vinutí z vodičů, které jsou izolovaně uloženy v drážkách rotorového svazku plechů. Vinutí motoru se zapojuje do hvězdy a konce jsou spojeny s třemi vzájemně izolovanými sběracími kroužky, které jsou připevněny na hřídeli rotoru. Těchto kroužků se dotýkají grafitové kartáče, od nichž je veden přívod na rotorovou svorkovnici. K těmto svorkám je připojen spouštěč, pomocí něhož se dá zvyšovat odpor rotorového vinutí.

Synchronní otáčky jsou dány vztahem:

$$n_s = \frac{60 f_s}{p} \quad (\text{ot} \cdot \text{s}^{-1}; \text{Hz}, -, )$$

Kde  $n_s$  jsou otáčky,  $f_s$  je frekvence napájecího proudu sítě a  $p$  je počet pólových dvojic. [9]

### 2.1.2 Synchronní motory

Synchronní motor má tu vlastnost, že se nedokáže sám rozeběhnout. Pokud ho připojíme k síti bez pomocného obvodu, nastane velký proudový náraz. Proto je ve statoru uložen pomocný obvod, který je nazýván budič. Ten je tvořen spouštěcími reaktory, které se zkratují při spuštění motoru. Konstrukce statoru je obdobná jako u motoru asynchronního. Má tedy střídavé, ve většině případů trojfázové vinutí a rotor je buzen stejnosměrným proudem. U motorů menších výkonů se používají permanentní magnety. Přivedením trojfázového proudu na statorové vinutí, vzniká obdobně jako u motorů asynchronních točivé magnetické pole, které s sebou unáší magnetové kolo buzeného rotoru. Synchronní motor se po roztočení otáčí synchronně s točivým magnetickým polem přesně danými synchronními otáčkami. Tyto otáčky se nemění ani při zatížení motoru a kvůli těmto vlastnostem vzniklo pojmenování synchronní stroj.

#### Rozdělení motorů podle budícího obvodu:

- s permanentními magnety na rotoru
- s vinutým budícím obvodem – budící vinutí na rotoru
- reluktanční motory

### Rozdělení podle uspořádání vinutí na rotoru:

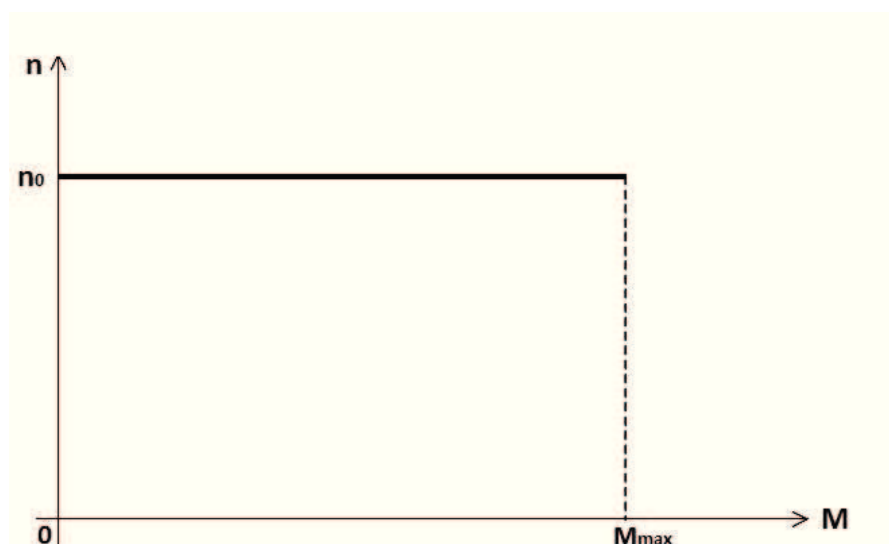
- s vyjádřenými póly
- s hladkým rotorem

### Momentová charakteristika synchronního motoru:

Synchronní otáčky jsou nezávislé na zatížení momentu zatížení.

$$n_{0s} = \frac{60 f_1}{p} = n_{0ns} \left( \frac{f_1}{f_{1n}} \right) \quad (\text{ot} \cdot \text{m}^{-1}; \text{Hz}, -, )$$

Kde  $f_1$  je napájecí kmitočet a  $p$  je počet pól párů.



Obrázek 5 momentová charakteristika synchronního motoru [10]

Z momentové charakteristiky vyplývá, že při zatěžování se otáčky motoru nemění, zvětšuje se tzv. zátěžný úhel  $\theta_L$  mezi statorem a rotorem. Po překročení zátěžného úhlu dojde k zastavení motoru, čemuž odpovídá hodnota na obr. č. 6 v charakteristice. Motor pak odebírá velký proud nakrátko a je v poruchovém stavu. Asynchronní motor a jeho rychlost je tedy možné řídit pouze napájecím kmitočtem  $f_1$ . S novodobou výkonovou technikou už však není problém konstruovat měniče kmitočtu pro požadavky těchto motorů. [3] [10]



## 2.2 Stejnosměrné elektromotory

Princip motoru objevil v roce 1873 belgický konstruktér a vynálezce Zénobe Gramme. Je to tedy nejstarší typ elektromotoru. Pro své vlastnosti se však využívají stále ve velkém zastoupení, ať už v regulovaných pohonech, v robotice, mikroelektronických pohonech a jiných oblastech. Jejich velkou výhodou je, že se bez úprav v konstrukci dají použít jak jako motor, tak jako stejnosměrný generátor. Toto je dáno druhem dodávané energie. Na konektory motoru přivádíme stejnosměrný proud, který prochází přes vodiče kotvy. Tyto vodiče jsou umístěny v magnetickém poli, ve kterém působí síla, která má za následek otáčení kotvy motoru. Pokud by však vodiči procházel trvale stejnosměrný proud, přestaly by se vodiče pohybovat po dosažení neutrální meze, která je v ose mezi dvěma sousedními póly. Tento problém se řeší změnou smyslu proudu po přechodu od jednoho pólu ke druhému. Změnu smyslu proudu u stejnosměrných motorů řeší přístroj, který se nazývá komutátor.

Je to tedy rotující část motoru. Skládá se z měděných hliníkových lamel, elektricky navzájem izolovaných slídovou izolací. U malých motorů je řešením termosetická pryskyřice. Lamely, ke kterým jsou připojeny předepsaným způsobem vývody cívek vinutí kotvy, tvoří dutý válec, který je elektricky izolovaně spojený s hřídelí motoru. Komutátor plní vlastně funkci usměrňovače. Napětí střídavého charakteru indukované ve vinutí kotvy se mění na napětí stejnosměrné. Prostřednictvím komutátoru se na kotvu proud buď přivádí, nebo z kotvy odvádí. U stejnosměrných motorů je právě komutátor častým zdrojem závad, kvůli jeho složitosti a mechanickému zatěžování, ale také kvůli velkým proudům, které musí přenášet. Navíc vzniká elektromagnetické rušení, které má za následek jiskření. Z tohoto důvodu nemůže být používán v prostředí s možností výbuchu. Stejnosměrný motor můžeme tedy rozdělit na tři hlavní části, a to: rotor, stator a rotační přenosové ustrojí, neboli zmiňovaný komutátor. Stator jako pevná část motoru, kterou většinou tvoří magnetický obvod z pevného permanentního magnetu, nebo jsou to dynamoplechy s drážkami, v nichž se nacházejí cívky, které tvoří statorové elektromagnetické pole. Rotor je u stejnosměrných motorů vždy tvořen cívkami, do nichž je přivedena elektrická energie a vytváří tak rotorové magnetické pole, které vzájemnou interakci vyvolá pohyb.

Pro všechny druhy jednosměrných motorů je možné odvodit všeobecně platné základní vztahy.

- **Indukované napětí ve vinutí kotvy:**

$$U_i = c \Phi \omega \quad (\text{V; } -, \text{Wb, rad} \cdot \text{s}^{-1})$$

Kde  $c$  je konstrukční konstanta stroje,  $\Phi$  je magnetický tok a  $\omega$  je úhlová rychlost otáčení kotvy.

- **Proud protékající kotevním obvodem při ustáleném stavu:**

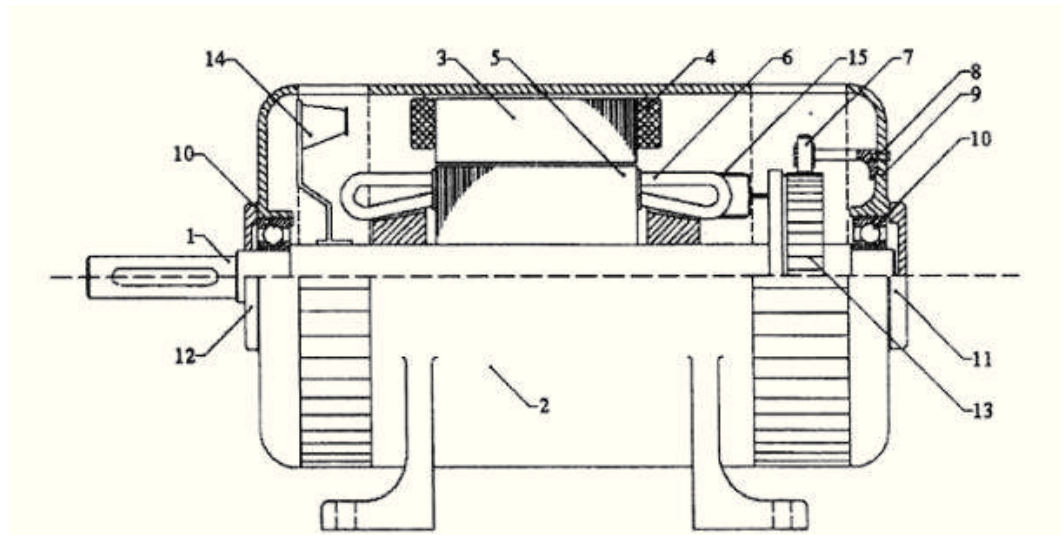
$$I_a = \frac{U_a - U_i}{R_a} \quad (\text{A; V, V, } \Omega)$$

Kde  $U_a$  je napájecí napětí kotvy,  $U_i$  je indukované napětí kotvy,  $R_a$  odpor kotvy.

- **Mechanický moment na hřídeli motoru:**

$$M_M = c \Phi I_a \quad (\text{Nm; } -, \text{Wb, A})$$

Kde  $c$  je konstrukční konstanta stroje,  $\Phi$  magnetický tok,  $I_a$  proud kotevního obvodu.



Obrázek 6 Složení stejnosměrného motoru [11]

**Legenda:** 1 – volný konec hřídele, 2 - statorová kostra, 3 – hlavní pól, 4 – budící vinutí, 5 – rotor, 6 – vinutí rotoru, 7 – držák kartáče, 8 – brejle, 9 – přední víko motoru, 10 – ložiska, 11 – víko předního ložiska, 12 – víko zadního ložiska, 13 – komutátor, 14 – ventilátor, 15 – vývod rotorového vinutí na komutátor

Stejnoseměrné motory s budícím vinutím na hlavních pólech dělíme podle toho, jakým způsobem je napájeno toto vinutí. [12] [10]

### **2.2.1 Derivační motory**

Vinutí statoru je u tohoto motoru připojeno paralelně ke stejnému zdroji jako vinutí rotorové. Tím je vázáno buzení statorového a rotorového magnetického pole a velikost elektromagnetického pole v mezích dimenze rotoru. Otáčky jsou přímo závislé na velikosti napětí, které přivedeme na rotorové cívky. Moment motoru je závislý na proudu, který v daný okamžik prochází rotorem. Zpravidla bývá velice stálý. Při nižším napájecím napětí není statorový magnetický tok v nasyceném stavu. Momentová charakteristika má tvar paraboly a otáčková hyperboly. Otáčky při zatížení nejdříve poklesnou, jakmile se však magnetický tok dostane do nasyceného stavu, začne se momentová charakteristika napřimovat a otáčky se zatížením téměř neklesají. Záběrný moment je veliký a z toho důvodu se používá derivační motor tam, kde je předpoklad velmi častého rozběhu s velkou zátěží. Jsou to tedy jeřáby, dopravní pásy, dělicí stroje. Naopak derivační motory nepoužíváme tam, kde by se při chodu motoru mohla odpojit zátěž. [13]

### **2.2.2 Sériové motory**

Na rozdíl od derivačního motoru je u sériových motorů vinutí statoru sériově připojeno na stejný zdroj elektrické energie jako rotorové vinutí. Tím je vázáno buzení statorového magnetického pole a jeho velikost v dimenzi rotoru s rotorovým magnetickým polem. Moment je závislý na proudu, který v daný okamžik prochází rotorem. Rozběh se řídí sériovým odporem v kotvě. Zvětšováním tohoto odporu se zeslabuje statorové magnetické pole. Při spouštění motoru musí být odpor roven nule, otáčky začnou při zvětšování zátěže klesat. Přepólováním statorového budícího vinutí se změní smysl statorového budícího magnetického toku, čímž dojde ke změně smyslu otáčení. [13]

### **2.2.3 Kompaundní motory**

Vinutí statoru je u těchto motorů rozděleno na dvě části. Je připojeno paralelně a sériově na totožný zdroj elektrické energie jako vinutí rotorové. Z tohoto důvodu je buzení statorového magnetického pole, a tedy jeho velikost v dimenzi rotoru, poutáno na obě budicí části. Charakteristické vlastnosti motoru se určují podle toho, které z těchto budících vinutí působí v daný moment silněji. Otáčky a moment mají spíše vlastnosti sériového motoru. Pokud nastane stav, že se obě síly budou navzájem rovnat, bude záběrný moment větší než u motoru derivačního a otáčky nebudou tolik klesat. Pokud působí obě části vinutí proti sobě, dostaneme na rotoru tvrdé otáčky při změnách zatížení. Při vzrůstu zátěže otáčky klesají, to znamená, že v sériové části vinutí teče větší proud, který zeslabí buzení, a to má za následek opětovný nárůst otáček. Kompaundní motory se kvůli těmto vlastnostem nepoužívají tam, kde by mohlo dojít k odpojení zátěže. Zátěž se připojuje přes zubový převod nebo pevnou spojku. [13]

## 2.2.4 Motory s cizím buzením

Hlavní póly budicího vinutí motoru jsou napájeny z nezávislého zdroje. Nebo, jak je tomu i v případě této bakalářské práce, má motor permanentní magnety. Tomuto konstrukčnímu zapojení říkáme motor s konstantním buzením. Díky přivedenému napájení z konstantního zdroje se zaručí neustálé buzení a tedy velikost statorového elektromagnetického pole v dimenzi rotoru. Rotorové magnetické pole je u těchto motorů závislé na dodávaném napětí do rotoru. Pole rotoru není se statorovým polem přímo vázáno. Díky těmto konstrukčním vlastnostem lze tyto motory nejsnáze regulovat. Otáčky tedy závisí pouze na velikosti přivedeného napětí na cívky rotoru. Moment motoru závisí přímo na proudu, který v daný okamžik prochází rotorem. U motorů s velkým výkonem se se ke statorovému vinutí přidává odpor do série. Změnou velikosti tohoto odporu lze regulovat rozběh motoru a to tak, že ovlivňujeme velikost magnetického pole. Momentová a otáčková charakteristika je ve výsledku velice „tvrdá“. To má za následek stále držení otáček i při zatížení motoru. Moment narůstá konstantně až po hodnotu nasycení. Změna smyslu otáčení hřídele se realizuje přepólováním konců statorového budicího vinutí v zapojení. Tímto změníme účel statorového budicího magnetického toku. Způsoby řízení rychlosti motoru jsou tedy pomocí napětí zdroje  $U_a$  nebo další možnost odporem  $R_a$  a poslední možností je řízení rychlosti magnetickým tokem  $\phi$ . Řízení odporem  $R_a$  se již kvůli hospodárnosti nevyužívá. Změna rychlosti magnetickým tokem  $\phi$  se nedá použít pro motory s permanentními magnety a její použití je v dnešní době minimální. [13] [10]

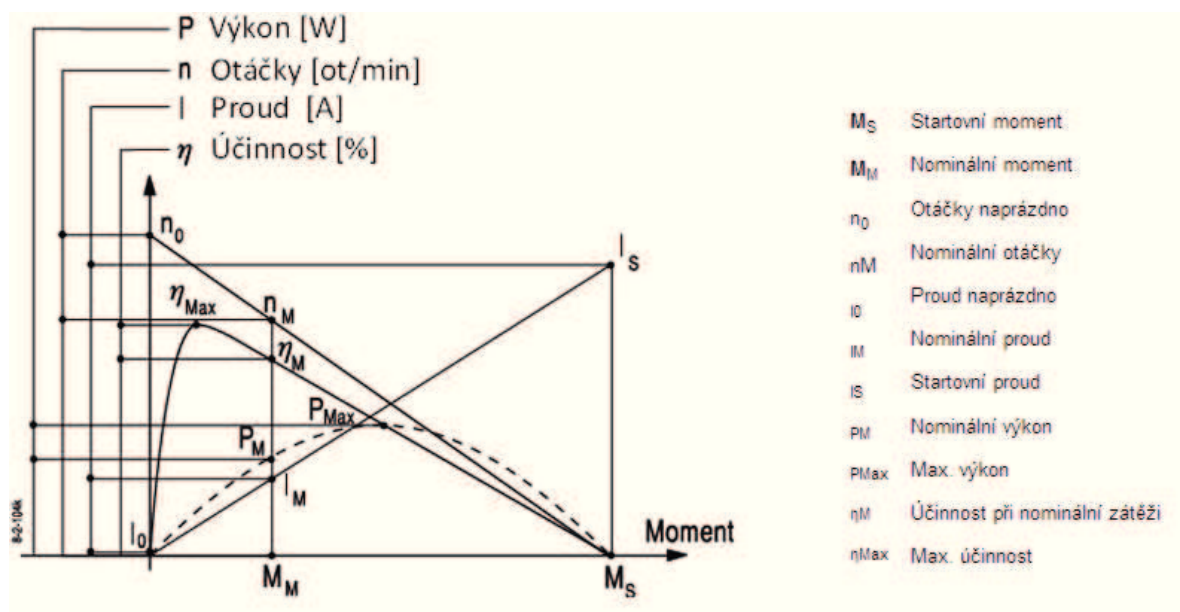
### 2.2.4.1 Motor s permanentními magnety

Pole se u motoru s permanentními magnety tvoří mezi dvěma nebo více použitými magnety, konkrétně toliko, jako je počet pólů. Nejčastěji se jedná o typy feritových magnetů. Díky tomuto nemá motor vinutí pro tvorbu pole a pro připojení motoru stačí dva vodiče. Charakteristika motoru vykazuje velmi dobré vlastnosti a díky tomu se stal tento motor dominantní mezi motory do výkonu 1kW. Nejlepší vlastnost motoru je, že při dodávání konstantního napětí jsou proud a otáčky úměrné momentu. U motoru s permanentními magnety je snadné měřit otáčky a točivý moment za provozu.



Obrázek 7 Ukázka použitého typu motoru pro konstrukci realizovaného pohonu [14]

## Momentová charakteristika motoru s permanentními magnety



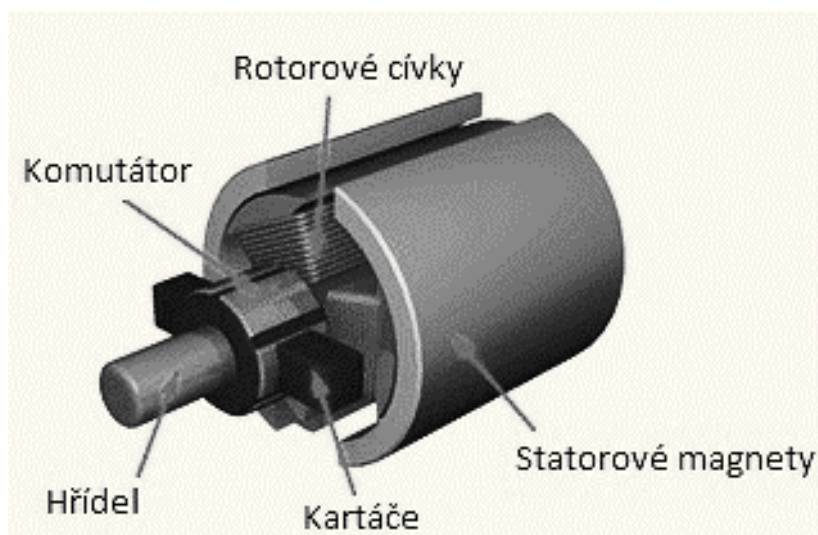
Obrázek 8 momentová charakteristika motoru s permanentními magnety [15]

Rozběhový moment je u tohoto motoru až 8krát vyšší než točivý moment. Jmenovitý moment je závislý na tepelných vlastnostech a proto může být při občasných zatíženích použit motor s nižším jmenovitým výkonem, než je určeno. Pokud je záběrný moment příliš vysoký, používá se omezení proudu při rozběhu. Toto omezení má většina komerčních motorů jako standard. Metoda šetří motor a snižuje jeho mechanickou zátěž a tím prodlužuje jeho životnost. Jak již bylo řečeno, motory změni směr otáčení při změně pólů. Pokud se otáčky přepnou příliš rychle, znamená to, že se póly změni do doby, než se stačil zastavit rotor, nastane u motoru riziko demagnetizace. Motor je vynikající generátor a výstupní napětí je úměrné rychlosti. Bude se tedy generovat napětí ve směru napájecího a motor bude vystaven až dvojnásobnému napětí. Z tohoto důvodu zjišťujeme u motorů bez proudového omezení tzv. rozběhový proud  $I_S$ .

$$I_S = \frac{U}{R_a} \quad (I; V, \Omega)$$

Kde  $U$  je napájecí napětí a  $R_a$  je odpor kotvy.

Budeme-li chtít motor často přepólovat, nesmí hodnota  $I_S$  přesáhnout polovinu maximálního povoleného proudu. [15]



Obrázek 9 Stejnosměrný motor s permanentními magnety (upraveno autorem) [15]

### 3 Řízení otáček motoru

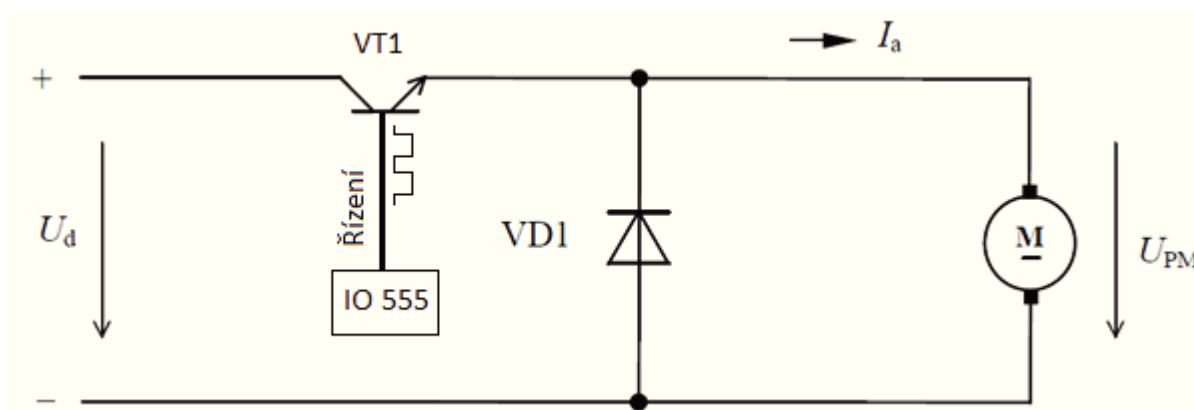
Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, bez možnosti řízení rychlosti otáček motoru by jeho využití v aplikacích bylo téměř ve všech oblastech nepoužitelné nebo by postrádalo smysl. Tato kapitola se tedy zaměřuje právě na řízení otáček stejnosměrných motorů, konkrétně motorů s permanentními magnety použitých v pohonu, jenž je konstruován. Motor má konstantní magnetický tok, který je určen použitým typem magnetu a konstrukcí magnetického obvodu. Otáčky se tedy řídí změnou napětí kotvy pomocí stejnosměrného napětí. Tato regulace otáček motoru však není vhodná z energetického hlediska. Proto se z důvodu úspory energie používá k řízení motorů pulzně šířková modulace. Pro řízení otáček konstruovaného pohonu je tedy k napájení použit jednokvadrantový pulzní měnič. To znamená, že dostaneme napětí a proud pouze jedné polarity.

Střední hodnota je přímo úměrná řídicímu napětí a její odvození je tedy:

$$U_s = U_d \frac{T_1}{T} = U_d \frac{U_r}{U_{pmax}} = \frac{U_d}{U_{pmax}} U_r = K U_r \quad (V; V, V, s, s, -, V)$$

Kde  $U_d$  je napájecí napětí,  $T$  a  $T_1$  jsou periody proudu protékajícího kotevním obvodem  $I_a$ ,  $U_{pmax}$  je maximální napětí,  $K$  je zesílení a  $U_r$  je řídicí napětí.

Základní obecné zapojení jednokvadrantového pulzního měniče je na obr. č. 10. Výkonový tranzistor VT1 je tak ovládán pulzně šířkovou modulací PWM.



Obrázek 10 jednokvadrantový pulzní měnič s připojeným motorem (upraveno autorem) [16]

Otáčky můžeme řídit pouze v jednom směru a moment je generován také pouze v jednom směru. Celkové napájecí napětí se rozdělí na úbytek na výkonovém tranzistoru VT1 a na úbytek na motoru. Dioda VD1 plní funkci ochrany tranzistoru proti zápornému napětí, které se vygeneruje na vinutí motoru. [10] [15] [16] [17]

### 3.1 Pulzně šířková modulace PWM

Pulzně šířková modulace ve zkratce označována jako PWM je modulace diskrétního charakteru a využívá se pro přenos analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu. Veličiny, které se používají jako dvouhodnotové, jsou napětí a proud. Tyto signálové veličiny se přenášejí pomocí střídů. Demodulace se pak řeší zapojením dolnofrekvenční propusti. Díky těmto charakteristickým vlastnostem se PWM ve velkém zastoupení využívá ve výkonové elektronice pro řízení veličin, tedy proudu a napětí. Kombinací PWM modulátoru a demodulátoru dolnofrekvenční propusti získáme jednoduché zapojení D/A převodníku.

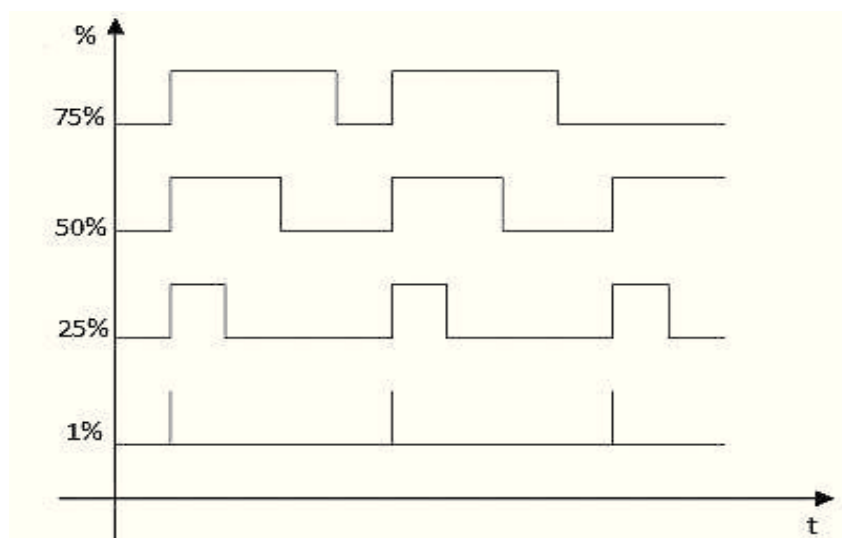
#### Princip PWM

Informace o přenášené hodnotě nese přenosný signál. Tento signál může být buď na hodnotě log. 1 zapnuto, nebo log. 0 vypnuto. Přenášený signál je tedy zakódován v poměru mezi stavy zapnuto a vypnuto. Takovému poměru potom říkáme střída. Perioda je u tohoto signálu velikost přenosu jedné střídě. Jedná se o součet zapnuto a vypnuto. U PWM je tudíž informace na hodnotách 0 % nebo 100 %,

proto musíme znát poměr mezi skutečnou hodnotou a procentuálním vyjádřením. Přesnost řízení se pohybuje u PWM v sekundách, u náročnějších aplikací v milisekundách.

### PWM a její využití ve výkonové elektronice

V dnešní době téměř všechny měniče, ať už se jedná o měniče DC/DC, frekvenční měniče, střídače využívají nějakou formu PWM modulace. Tranzistor jako jeden ze základních výkonových spínacích prvků má nízké ztráty ve dvou stavech. Když je ve stavu plně sepnutém nebo ve stavu plně vypnutém. V plně vypnutém stavu je na něm napětí, ale neteče přes něj žádný proud. Můžeme tedy říci, že jeho ztráty v tomto stavu jsou nulové. Když se plně sepne, teče přes něj proud, ale napětí na něm je pouze napětí saturační. Toto napětí je hodně nízké a ztráty jsou tak minimální, to platí i pro ztráty výkonové. Při každém spínání tranzistor prochází přes oblast vysokých ztrát, tyto ztráty rostou z frekvencí spínání. PWM díky vlastnosti přenést dvouhodnotově modulovaný signál při dané spínací frekvenci patří mezi základní techniky ve výkonové elektronice.



Obrázek 11 průběhy PWM modulace vyjádřeny v % [18]

Z obr. 11. vidíme průběhy PWM modulace v šíři impulzu od 1%, které odpovídá minimální šířce impulzu, až po šířku 75% výkonu modulace. Dosažení 100% výkonu zajistíme tak, že plně sepneme výkonový spínací prvek. Pro jednokvadrantový pulzní měnič, který napájí motor, je tedy PWM modulace ideálním řešením řízení. Protože proud a napětí zůstávají stejné, ale mění se aktivní doba, kdy prochází proud motorem. Motor bude mít větší sílu i při nízkých otáčkách a jeho ztráty budou prakticky nulové. Spínání nám zajistí výkonový tranzistor. [17] [16] [19]



## 3.2 Výkonové spínací prvky

### 3.2.1 Bipolární tranzistory

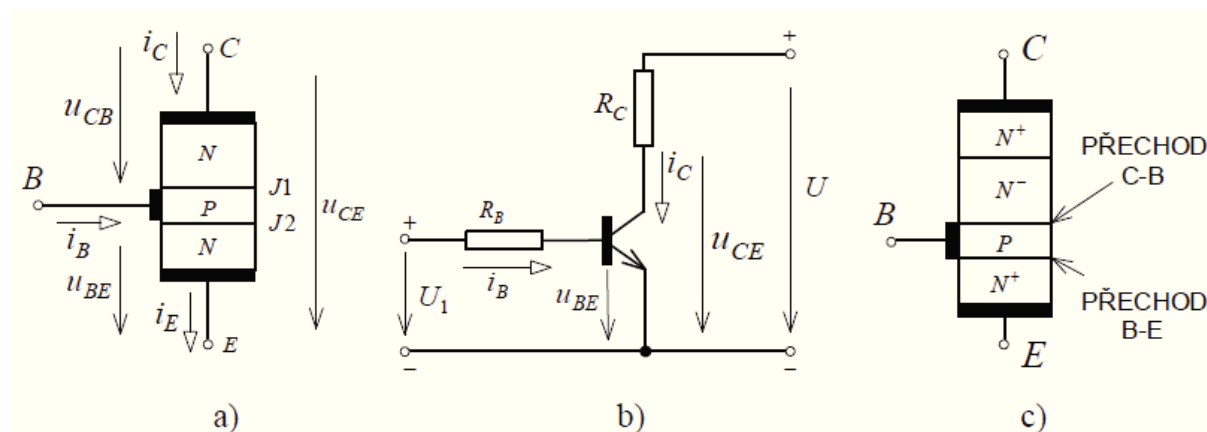
Bipolární tranzistor je polovodičová součástka, která má dva přechody. Má v sobě vytvořeny tři oblasti s různým typem vodivosti. Podle typu je rozlišujeme na NPN a PNP tranzistory. První část nazýváme emitor. Druhou, prostřední část tranzistoru, nazýváme báze a je od emitoru oddělena tzv. emitorovým přechodem  $J_E$ . Třetí část je kolektor, ten je od báze oddělen kolektorovým přechodem  $J_C$ . Důležitá činnost bipolárního tranzistoru je řízená injekce minoritních nosičů emitorem do oblasti báze a následná extrakce nosičů kolektorem. Bipolární tranzistor má čtyři režimy práce, ve kterých může pracovat.

- Jsou-li přechody  $J_E$  a  $J_C$  polarizovány závěrně, je tranzistor v nevodivém stavu a jedná se o závěrný režim.
- Přechody  $J_E$  a  $J_C$  jsou ve směru propustném neboli nasyceném, jedná se o saturační režim. Zapojením teče velký proud, který má konstantní hodnotu. Velikost proudu je dána napájecím napětím a odporem v kolektorovém obvodu.
- Přechod  $J_E$  se polarizuje v propustném směru, přechod  $J_C$  je v závěrném směru. Jedná se o aktivní režim, tento stav je nejčastějším stavem tranzistoru. Proudem báze se řídí jak emitor, tak kolektor.
- Přechod  $J_E$  se polarizuje do závěrného směru a kolektorový přechod  $J_C$  naopak do propustného. Tomuto režimu pak říkáme inverzní režim. Vede po překročení mezních údajů přechodu  $J_E$  v závěrném směru ke zničení tranzistoru.

Poměr napětí na vstupu a napětí na výstupu je u tranzistoru značný, díky tomuto jevu má tranzistor základní vlastnost, kterou nazýváme tranzistorový jev. Je to tedy schopnost velkého zesílení výkonu. Podle toho, která elektroda je společně připojena na vstupní a výstupní svorky, zapojení rozdělujeme tranzistor do třech základních zapojení.

- zapojení se společnou bází
- zapojení se společným emitorem
- zapojení se společným kolektorem

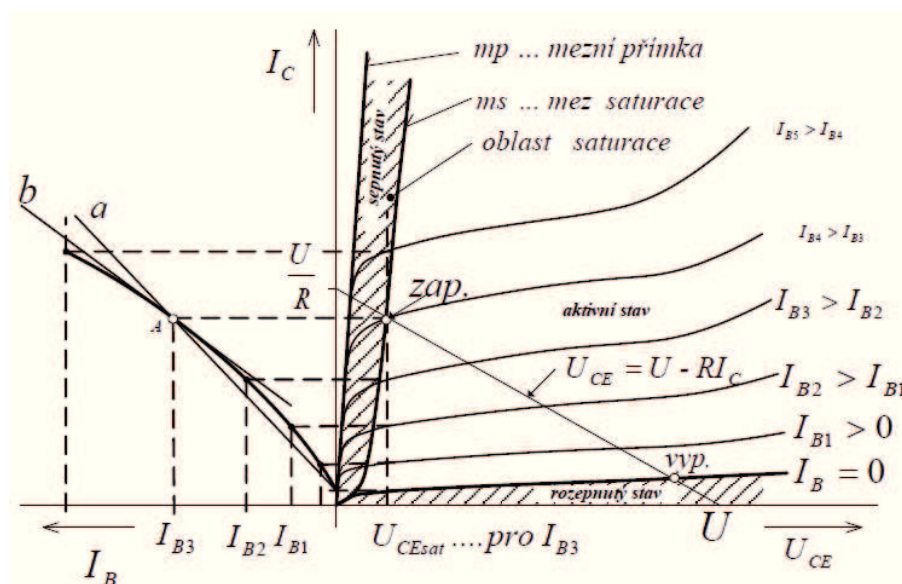
Ve výkonových spínacích aplikacích se však používá výhradně tranzistor NPN v zapojení se společným emitorem. V tomto zapojení se řídicí proud přivádí do obvodu báze-emitor. Na obr. 12. a, b. je zobrazena struktura a zapojení se společnou bází tranzistoru. Pokud chceme zvýšit napět'ovou odolnost bipolárních tranzistorů ve stavu rozepnutém, musíme při konstrukci tranzistoru provést technologické úpravy polovodičových struktur. Tento princip je zobrazen na obr. č. 12. [20] [21]



Obrázek 12 Struktura a princip bipolárního tranzistoru pro spínací aplikace [21]

### Voltampérová charakteristika tranzistoru v zapojení se společným emitorem.

Pro výkonové aplikace má význam především výstupní charakteristika tranzistoru  $I_C = f(U_{CE})$ . Charakteristika je zobrazena na obr. 13. a je měřena při dodávání konstantního proudu báze  $I_B$ .



Obrázek 13 výstupní voltampérová charakteristika v zapojení se společným emitorem [21]

### 3.2.2 Unipolární tranzistory

U těchto typů tranzistorů teče proud pouze jedním typem polovodiče, což je hlavní rozdíl oproti bipolárnímu tranzistoru, kde proud prochází přes PN přechod. Proud je ve vodivém kanálu řízen elektrickým polem. Tento vodivý kanál je buď typu P, nebo N. Elektrody mají označení Source, což je zdrojová elektroda a odpovídá emitoru, a Drain jako obvod nábojů odpovídá kolektoru. Řídící elektrodu nazýváme Gate a odpovídá bázi. Při výrobě je pomocí planární technologie v monokrystalu, který je buď typu P nebo N, vytvořen vodivý kanál pomocí difuze tak, aby dosáhl vodivosti opačného typu než monokrystal substrát B, neboli z anglického jazyka Bulk. Substrát je spojen se zdrojem, aby se při průběhu řízení vyměňovali nosiče náboje mezi substrátem a kanálem. Báze je izolována od kanálu, jinak by totiž došlo k protékání mezi emitorem a bází. Tuto izolaci realizujeme dvojím způsobem. Buď PN přechodem, pak mluvíme o tranzistoru J-FET, nebo druhou tzv. izolační vrstvou, pak se jedná o tranzistor IGFET. Toto jsou dvě základní skupiny dělení unipolárních tranzistorů.

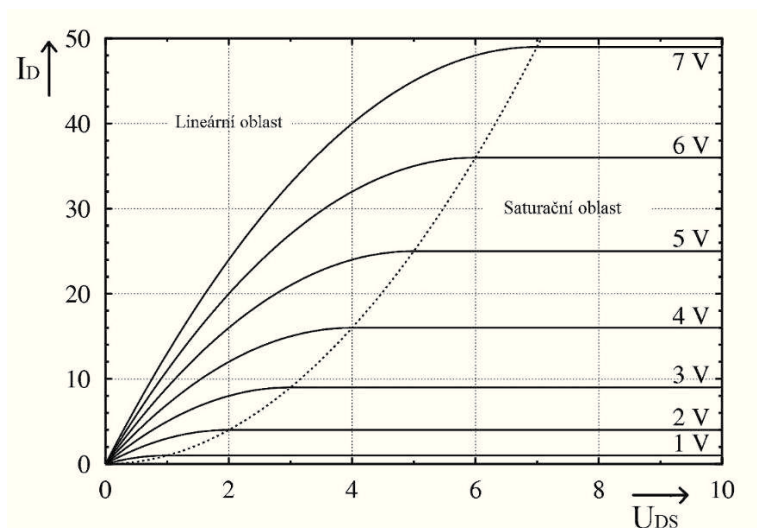
#### JFET tranzistor

Do základny, která má vodivost N a nízkou koncentraci příměsí, je vytvořena oblast P, která má větší koncentraci příměsí. Vrstva, která je závěrného charakteru mezi přechodem P-N, se pak dále rozšiřuje do substrátu. Pod touto vrstvou vzniká vodivý kanál a tímto kanálem procházejí majoritní nosiče substrátu. Pokud přivedeme mezi řídící a zdrojovou elektrodu napětí závěrného charakteru, způsobíme rozšíření závěrné vrstvy a snížení šířky kanálu, tímto zásahem se změní jeho vodivost. Vodivost kanálu je však ovlivněna také velikostí napětí mezi emitorem a kolektorem. Pokud budeme toto napětí zvětšovat až po hodnotu, kdy bude závěrné napětí proudu největší, dosáhneme zúžení kanálu na maximální mez. Po překročení napětí mezi emitorem a kolektorem dojde k uzavření kanálu. Hodnota saturačního proudu se dále nemění a je dána počtem majoritních nosičů, které překonají hraniční kanál N svým pohybem. V takto dosaženém stavu je tranzistor v závěrné oblasti. Rozdíl ve výstupní charakteristice JFETU oproti MOSFETU je v tom, že nemůžeme použít řídící napětí obou polarit. [20]

#### IGFET tranzistory

Nejrozšířenějším tranzistorem v této skupině je ve výkonové elektronice tranzistor se strukturou MOSFET. Ten se dále rozděluje do dvou skupin. Na MOSFET s vodivým kanálem a na MOSFET s indukovaným kanálem. Je to tedy polem řízený tranzistor, kde vodivost kanálu je mezi emitorem a kolektorem. Tato vodivost se ovládá pomocí elektrického pole, které se vytváří ve struktuře kov-oxid-polovodič napětím, které je přivedeno mezi bází a emitor. Toto hradlo se při výrobě odděluje od polovodiče tenkou vrstvou křemíku. Oxid se nejčastěji tvoří oxidem křemičitým. Elektroda, z níž je

vyráběna báze, je nejčastěji z hliníku. Kvůli limitaci křemíkové technologie napětí, která je v oblasti 600 V, bylo použití MOSFETU ve výkonové elektronice omezeno. Avšak Moderní technologie výroby, kdy se vyrábí tranzistor na bázi silikon-karbid a galium-arsenid, posunulo omezení MOSFETU na možnosti využití pro větší rozsah napětí a frekvencí. Výstupní charakteristika MOSFETU je zobrazena na obr. 14. [20] [21] [22]



Obrázek 14 Ukázka výstupní charakteristiky MOSFETU (upraveno autorem) (23)

### 3.2.3 IGBT tranzistory

Jedná se o bipolární tranzistor s izolovaným hradlem. Tyto tranzistory se konstruují pro velké rozsahy spínacích výkonů až po desítky MW a to při vysokých pulzních frekvencích v řádech kHz. Je to vlastně kombinace unipolární a bipolární součástky. Má vlastnosti MOSFETU na vstupu tranzistoru. Čip tranzistoru má tedy hradlo izolované tenkou oxidovou vrstvou. Na výstupu pak dostaneme charakteristiky bipolárního tranzistoru. Pro rozsah výkonů, vodivosti, spínací frekvence, a jednoduchého ovládání je IGBT tranzistor základním prvkem dnešních moderních frekvenčních měničů. Oproti tranzistoru MOSFET má tedy vyšší rozsah pracovních napětí a proudu. Další výhodou je nízký budicí výkon a nízké ztráty v zapnutém stavu. Nevýhodou je oproti MOSFETU nižší spínací frekvence. V současnosti můžeme říct, že se jedná o nejpoužívanější typ pro spínání velkých výkonů [24] [20]

## 4 Simulace pohonu v MATLAB SIMULINK

Zkoumání a přesné určení dynamických a jiných vlastností pohonů je základním požadavkem při konstrukci jakékoliv řízené nebo regulované soustavy. K tomuto účelu se výborně hodí interaktivní programové prostředí MATLAB.

MATLAB je světově uznávané programové prostředí a skriptovací programovací jazyk pro vědecké a technické numerické výpočty, modelování, počítačové simulace, návrhy algoritmů, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů.

Nástavbou pro MATLAB je SIMULINK. Jedná se o program k modelování dynamických systémů. SIMULINK využívá algoritmy MATLAB ve formě bloků pro numerické řešení převážně nelineárních diferenciálních rovnic. Je tedy vhodný pro rychlé vytváření modelů dynamických soustav ve formě blokových soustav a rovnic. Tento program jsem využil pro modelování pohonu, a to v následujících blocích: [25]

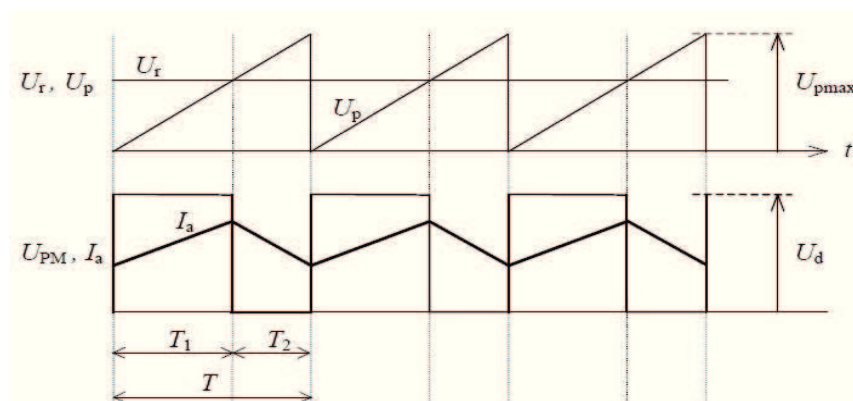
- jednokvadrantový pulzní měnič
- model stejnosměrného motoru
- model kompletního pohonu

### 4.1 Jednokvadrantový pulzní měnič

Při modelování vycházíme z idealizovaných stavů, které jsou:

- nulová impedance napájecí sítě
- nulový odpor v sepnutém stavu
- nekonečně velký odpor v rozepnutém stavu
- okamžité spínání a rozepínání tranzistorů - ideální komutace

Průběhy veličin pro řízení PWM jednokvadrantového pulzního měniče pro spojitý a přerušovaný proud jsou zobrazeny na obr. 11.



Obrázek 15. průběhy veličin měniče při PWM modulaci [16]

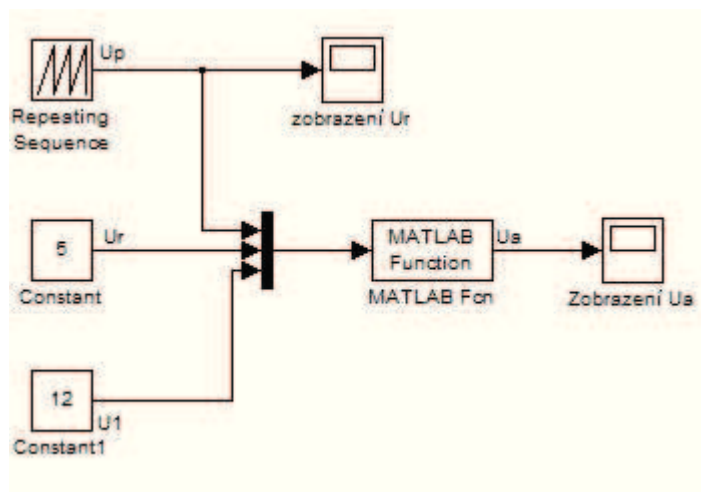
Kde  $U_p$  je napětí pily,  $U_r$  je řídicí napětí,  $U_{pmax}$  je maximální napětí pily,  $U_{PM}$  je pulzně modulované napětí,  $I_a$  je proud,  $U_d$  je maximální hodnota modulovaného napětí,  $T_1$  a  $T_2$  je poměr mezi střídou,  $T$  je celková perioda.

Důležité parametry jsou tedy jmenovité hodnoty motoru a to:

- jmenovité napětí 12 V
- jmenovitý proud 15 A
- spínací frekvence 1 kHz

Pro tyto parametry byl následně sestaven model měniče.

### Matematický model pulzního měniče



Obrázek 16 model pulzního měniče

Kde  $U_r$  a  $U_1$  jsou konstanty a  $U_p$  je zdroj obdélníkového signálu. Střídu měniče měníme změnou hodnoty  $U_r$ . Pro naprogramování měniče je použit blok MATLAB function.

MATLAB function:

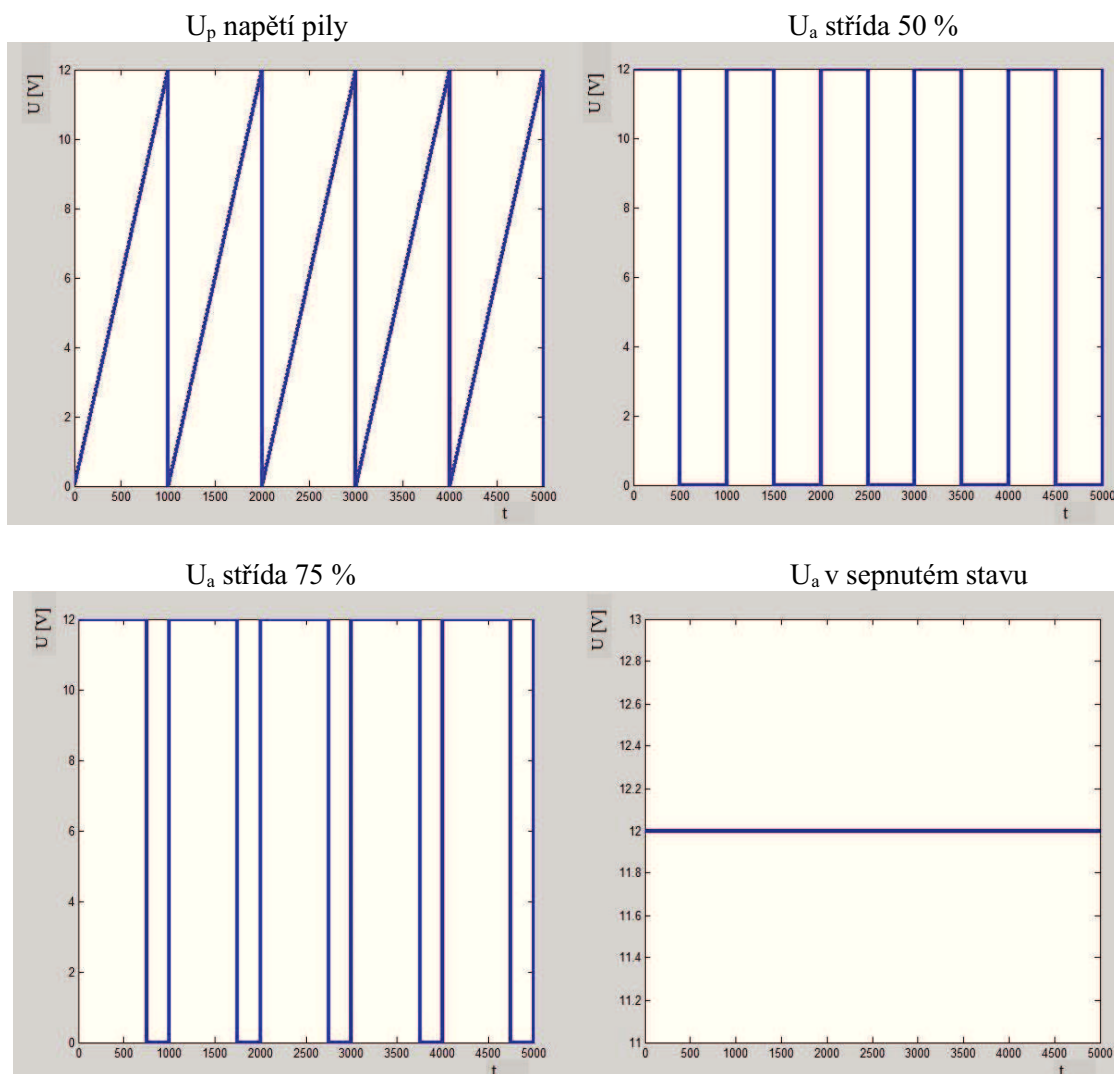
```
function [vystup]=PM(vstup)

if (vstup(1)<vstup(2))    %vstup1=Up, vstup2=Ur

    vystup=vstup(3);    %vstup3=U1

else
    vystup=0;
end
```

### Průběhy napětí na měniči:



Obrázek 17 Průběhy  $U_p$  a  $U_a$  měniče

## 4.2 Matematický model stejnosměrného motoru

Navrhnutý model je tedy motor s permanentními magnety za podmínky zjednodušených předpokladů a to:

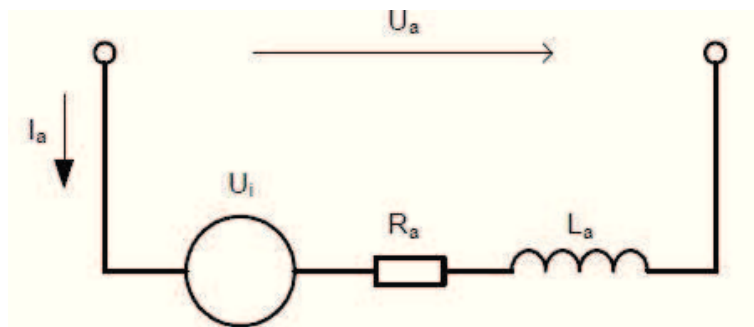
- konstantní parametry indukčnosti, odporu a konstanty motoru
- zanedbání reakce kotvy

### Jmenovité hodnoty motoru:

- napětí 12 V
- proud 15 A
- výkon 120 W
- otáčky  $4400 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

## Výpočet parametrů pro model motoru

Náhradní schéma DC motoru:



Obrázek 18 náhradní schéma DC motoru s cizím buzením [10]

Kde  $U_a$  je napájecí napětí rotoru,  $U_i$  je indukované napětí,  $I_a$  je proud rotoru,  $R_a$  je odpor rotoru a  $L_a$  je indukčnost rotoru. Je tedy nutné provést analýzu a výpočet veličin potřebných k návrhu modelu DC motoru.

### Odpor kotvy $R_a$ :

$$R_a = 0,5 \cdot (1 - \eta) \frac{U_{an}}{I_{an}} = 0,5 \cdot (1 - 0,8) \cdot \frac{12}{15} = 0,08 \, \Omega \quad (\Omega; -, V, I)$$

Při předpokladu účinnosti motoru 80 %.

### Indukčnost kotvy $L_a$ :

Indukčnost kotev stejnosměrných motorů můžeme vypočítat podle vztahu:

$$L_a = \beta \cdot \frac{U_{an}}{I_{an}} \cdot \frac{1}{\omega \cdot p} = 0,6 \cdot \frac{12}{15} \cdot \frac{1}{461 \cdot 2} = 0,52 \, mH \quad (H; V, I, rad \cdot s^{-1})$$

Kde  $\beta = 0,6$  pro motory bez kompenzačního vynutí a  $p$  je počet pólů. Další potřebný parametr je konstanta motoru  $c\phi$ , její výpočet je tedy:

### Konstanta motoru $c\phi$ :

$$c\phi = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{\omega} = \frac{12 - 0,08 \cdot 15}{461} = 0,0234 \quad (-; V, \Omega, A, rad \cdot s^{-1})$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost a její výpočet je následující:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot n}{30} = 461 \, rad \cdot s^{-1} \quad (rad \cdot s^{-1}; Hz, ot \cdot min^{-1})$$



**Indukované napětí  $U_i$ :**

$$U_i = c\phi \cdot \omega = 0,0234 \cdot 461 = 11 \text{ V} \quad (V; -, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$$

Následně můžeme vypočítat moment motoru  $M_M$  a elektrickou časovou konstantu  $\tau_{ac}$ .

**Moment motoru  $M_M$ :**

$$M_M = c\phi \cdot I_a = 0,0234 \cdot 15 = 351 \text{ mNm} \quad (\text{Nm}; -, A)$$

**Elektrická časová konstanta  $\tau_{ac}$ :**

$$\tau_{ac} = \frac{L_a}{R_{an}} = \frac{5,2 \cdot 10^{-4}}{1,2 \cdot 80 \cdot 10^{-3}} = 5 \text{ ms} \quad (s; H, \Omega)$$

Kde  $R_{an}$  je uvažován odpor při teplotě 20 °C a pro výpočet se provádí  $R_{an} = 1,2 \cdot R_a$

**Mechanická konstanta motoru  $\tau_m$ :**

$$\tau_m = \frac{J_c \cdot R_a}{c\phi^2} = \frac{1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,08}{0,0234} = 14 \text{ ms} \quad (s; \text{kg} \cdot \text{m}^2, \Omega, -)$$

Z rovnice je patrné, že k určení konstanty je třeba znát moment setrvačnosti motoru. Moment je určen z vycházení rovnice pro moment setrvačnosti válce.

Celková hmotnost motoru je 0,828 kg. Průměr válce pro vinutí je 40 mm a výška 40 mm. Z rovnice pro objem válce dostaneme jeho objem.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (20 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (\text{m}^3; m, m)$$

Kde  $r$  je průměr válce a  $h$  je výška válce.

Stanovená hustota mědi, ze kterého jsou vinuty cívky je 8960 kg/m<sup>3</sup>. Ze vztahu pro výpočet hustoty je vypočtena hmotnost válce.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}; \text{kg}, \text{m}^3)$$

Z tohoto plyne:

$$m = \rho \cdot V = 8960 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,450 \text{ kg} \quad (\text{kg}; \text{kg} \cdot \text{m}^3, \text{m}^3)$$

**Moment setrvačnosti válce je tedy:**

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,45 \cdot (20 \cdot 10^{-3})^2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2; \text{kg}, m)$$

**Pro přechod do Laplaceovy transformace platí následující rovnice:**

$$U_a(p) = U_i(p) + R_{ac}I_a(p) + L_{ac}p I_a(p)$$

$$U_a(p) = U_i(p) + R_{ac}I_a(p) + (1 + pT_{ac})$$

$$U_i(p) = c\emptyset \Omega_m(p)$$

$$M_e(p) = c\emptyset I_a(p)$$

$$M_e(p) - M_L(p) = J_c p \Omega_m(p)$$

Kde  $p$  je Laplaceova transformace.

Nyní je třeba určit operátorové přenosy:

**Přenos kotevního obvodu:**

$$F_a(p) = \frac{I_a(p)}{U_a(p) - U_i(p)} = \frac{\frac{1}{R_{ac}}}{1 + pT_{ac}}$$

$$Fc\emptyset(p) = \frac{M_e(p)}{I_a(p)} = c\emptyset$$

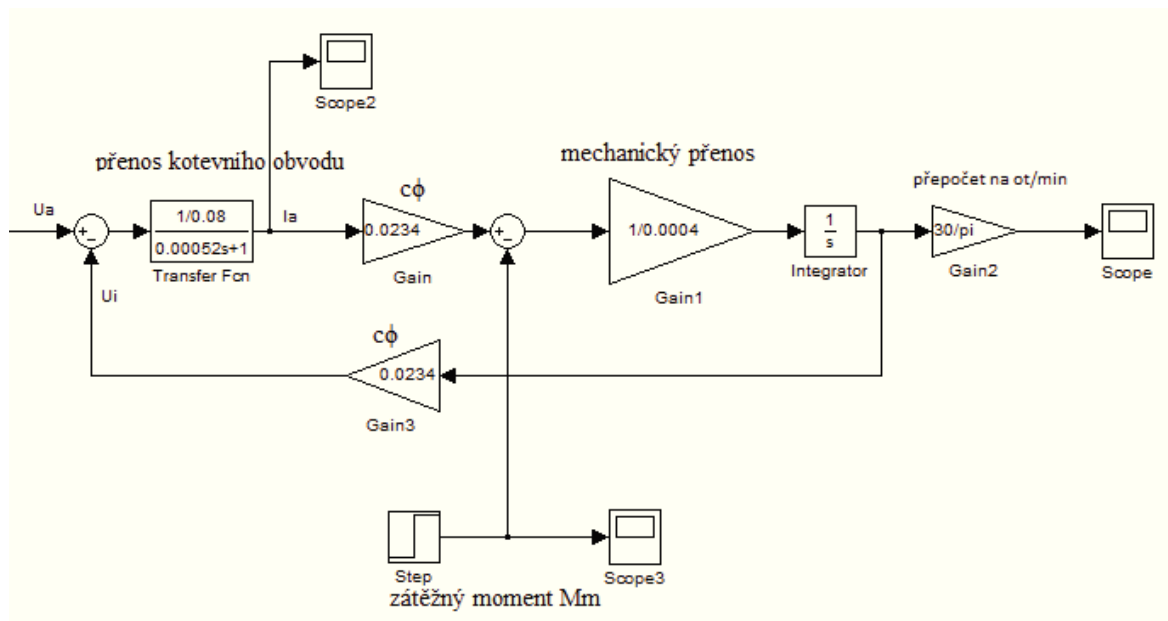
**Mechanický přenos:**

$$F_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{M_e(p) - M_L(p)} = \frac{1}{pJ_c}$$

**Přenos zpětné vazby:**

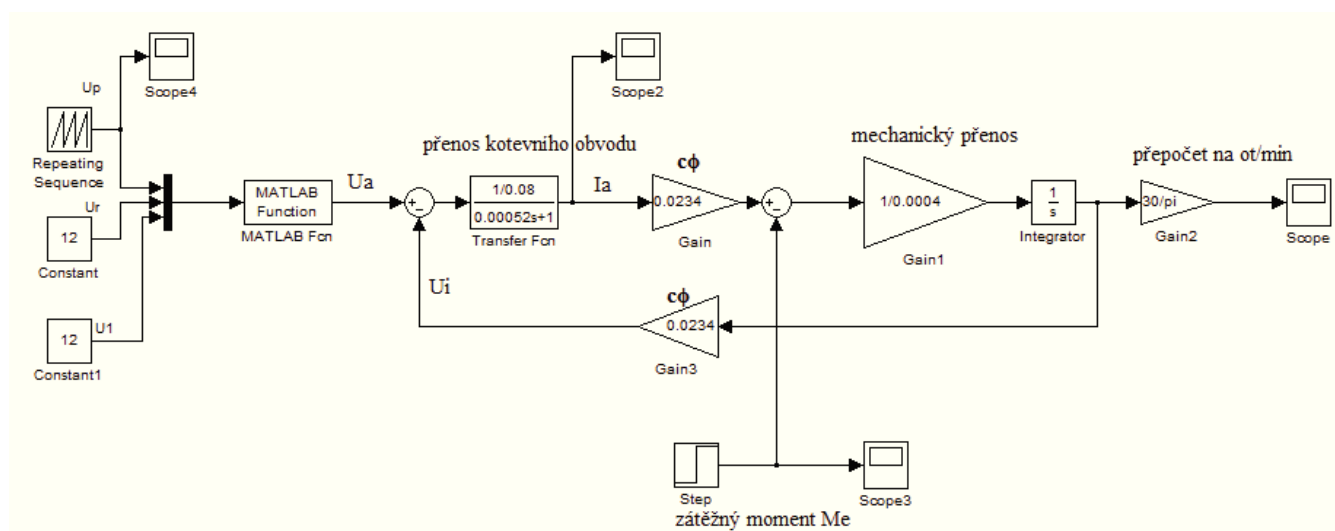
$$Fc\emptyset(p) = \frac{U_i(p)}{\Omega_m(p)} = c\emptyset$$

Nyní je možné sestavit model DC motoru s permanentními magnety pomocí uvedených přenosů, které jsou přímo v knihovně MATLAB SIMULINK. Model s vypočtenými hodnotami je na obr. 19.



Obrázek 19 matematický model DC motoru s permanentními magnety

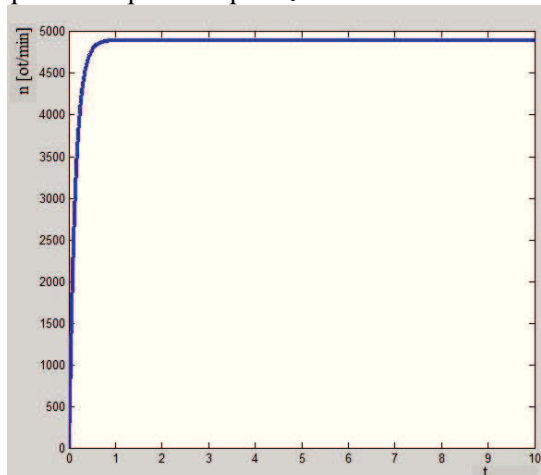
### 4.3 Kompletní model pohonu



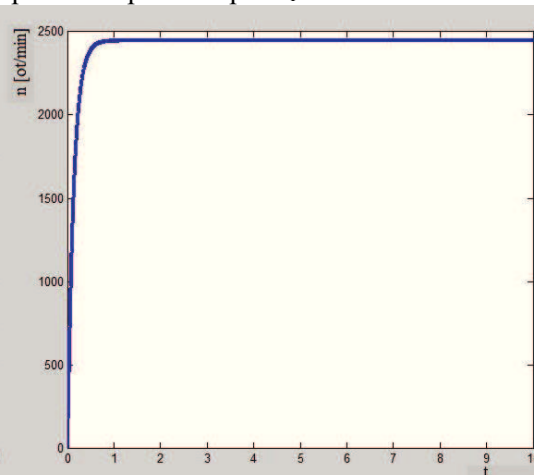
Obrázek 20 Kompletní model nasimulovaného pohonu

## Průběhy na simulovaném pohonu:

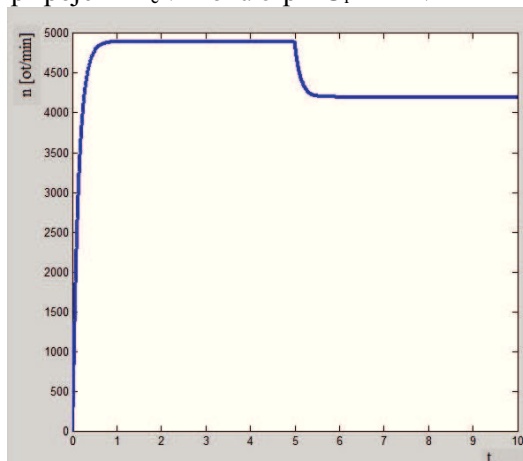
průběh naprázdno při  $U_r = 12$  V



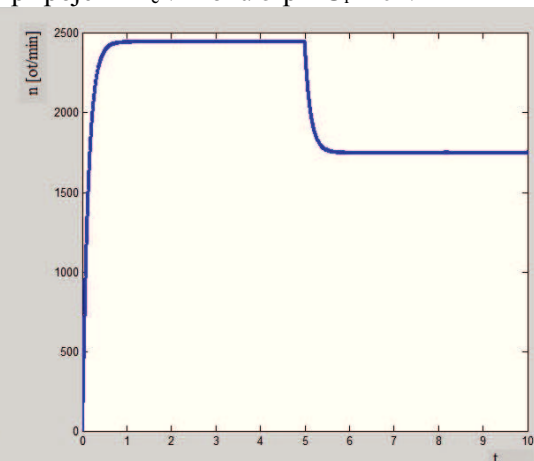
průběh naprázdno při  $U_r = 6$  V



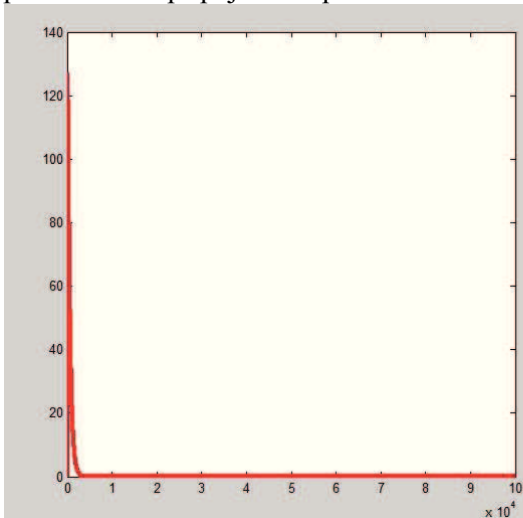
připojení  $M_e$  v kroku 5 při  $U_r = 12$  V



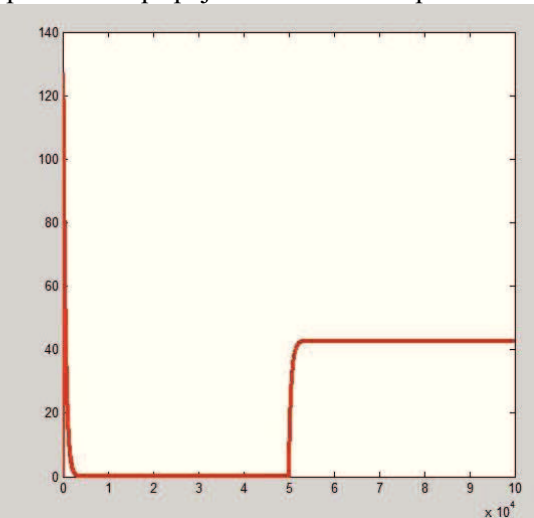
připojení  $M_e$  v kroku 5 při  $U_r = 6$  V



proud  $I_a$  bez připojení  $M_e$  při  $U_r = 12$  V



proud  $I_a$  s připojení  $M_e$  v kroku 5 při  $U_r = 12$  V



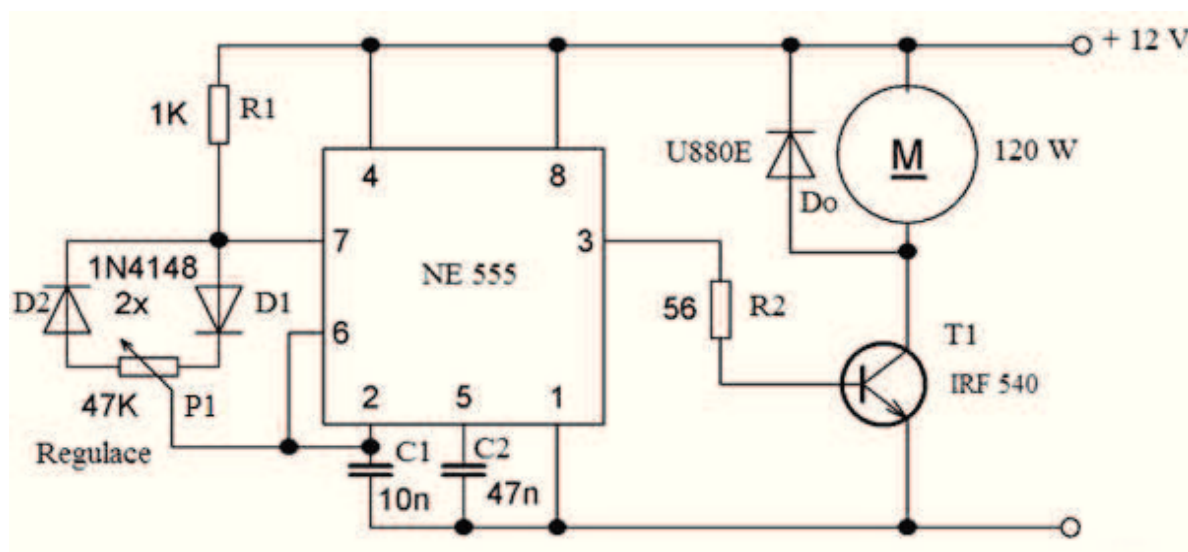
Obrázek 21 průběhy na pohonu

## 5 Realizace pohonu

### Typové označení motorů – 433 132 196 010

Při řešení problematiky zkompletování pohonu je postupováno následovně. Motory jsou vloženy do objímek od firmy Guvex o rozměru 60-64 mm. Objímky jsou mechanicky spojeny s ocelovou plechovou deskou o rozměru 700x155x5 mm, pod tuto desku je mechanicky upevněn podstavec. Hnací motor je spojen s motorem zatěžovacím přes hřídel pomocí spojky. Zatěžovací motor je spojen s tachodynamem, které slouží pro měření otáček. Po celkové konstrukci propojení motorů a tachodynamu bylo provedeno vycentrování spojek pro čistý chod pohonu. Pulzní měnič je přes distanční sloupky o délce 30 mm a průměru 5 mm spojen s podstavou pohonu. Pulzní měnič je sestaven na desce plošných spojů. Pro navržení desky byl použit program Eagle 6.4.0. Použita je volně stažitelná verze freeware, která má omezenou velikost plošného spoje. Všechny další funkce jsou plně přístupné.

### Obvodové schéma zapojení:

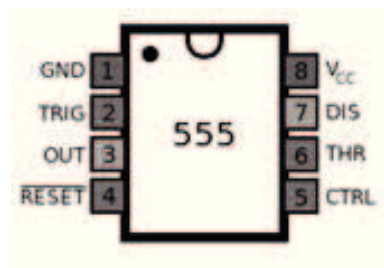
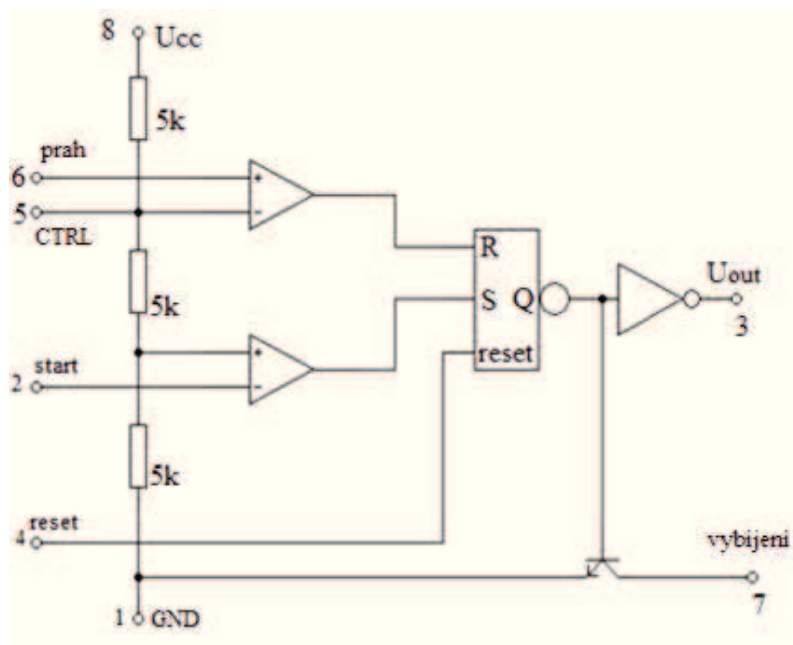


Obrázek 22 obvodové schéma zapojení (upraveno autorem) [26]

### Princip funkce

Základem zapojení je tedy obvod 555. Obvod je uspořádán v astabilním zapojení. Po připojení napájecího napětí se začne kondenzátor  $C_1$  nabíjet přes  $R_1$ ,  $D_1$  a potenciometr  $P_1$ . Během tohoto procesu je na výstupu log. L napětí 0 V. Zesilovač invertuje signál z RS klopného obvodu více Obr. 23. Spojené vstupy 2 a 6 kontrolují napětí na kondenzátoru  $C_1$ . Jakmile dosáhne kondenzátor hodnoty  $2/3 U_{cc}$ , RS klopný obvod se překlápí a na vývodu vybíjení se objeví nulové napětí. Kondenzátor se začne přes  $P_1$  a  $D_2$  vybíjet až do doby, kdy jeho napětí dosáhne  $1/3 U_{cc}$ . V ten okamžik se opět překlápí RS klopný

obvod a kondenzátor se znovu nabíjí přes  $R_1$  diodu  $D_1$  a potenciometr  $P_1$ . Nastavení středy se provádí pomocí potenciometru  $P_1$ . Kondenzátor  $C_2$  slouží k filtraci referenčního napětí. PWM signál z výstupního pinu je veden přes odpor na řídicí elektrodu  $T_1$ . Dioda  $D_0$  chrání tranzistor před napěťovými špičkami, které produkuje motor při komutaci.



Obrázek 23 Vnitřní zapojení IO 555 a rozložení pinů (upraveno autorem) [27]

## 5.1 Realizace pulzního měniče

### seznam použitých součástek

Tabulka 1 : seznam součástek

časovač	NE 555	
dioda	$D_0$	U880E
dioda	$D_1$	1N4148
dioda	$D_2$	1N4148
kondenzátor	$C_1$	10 n
kondenzátor	$C_2$	47 n
potenciometr	$P_1$	47 k
rezistor	$R_1$	1 k
rezistor	$R_2$	56 $\Omega$
tranzistor	$T_1$	IRF 540

Největší důraz při realizaci je kladen na výkonovou část obvodu. Přes tuto část protéká největší hodnota proudu. Jedná se tedy o ochrannou diodu  $D_o$  a tranzistor  $T_1$ . Z katalogových údajů byly vybrány odpovídající součástky pro splnění požadavků měniče. Další problematikou je chlazení těchto součástek, především tedy tranzistoru  $T_1$ . Proto je nutné provést navržení odpovídajícího chladiče pro tento tranzistor.

### 5.1.1 Navržení chladiče

**Výpočet celkových ztrát na tranzistoru:**

**Celková ztráta polovodičové součástky  $P_{TOT}$ :**

$$P_{TOT} = P_g + P_{CE} = 0,026 + 9,9 = 9,926 \text{ W} \quad (W; W, W)$$

Kde  $P_{ce}$  je ztráta na hlavním proudovém obvodu součástky,  $P_g$  je ztráta řídicí elektrody.

**Ztráta na hlavním proudovém obvodu součástky  $P_g$ :**

$$P_g = (E_{on} + E_{off}) \cdot f = (12,9 \cdot 10^{-9} + 6,9 \cdot 10^{-9}) \cdot 1000 = 0,026 \text{ W} \quad (W; J, J, Hz)$$

Kde  $E_{on}$  je ztráta energie při spínání,  $E_{off}$  je ztráta energie při vypínání,  $f_g$  pracovní frekvence spínače.

**Ztráta energie při spínání  $E_{ON}$ :**

$$\begin{aligned} E_{on} &= U_d \cdot I_d \cdot \left( \frac{t_r + t_f}{2} \right) + Q_{rr} \cdot U_d = 12 \cdot 15 \cdot \left( \frac{(35 + 35) \cdot 10^{-9}}{2} \right) + 550 \cdot 10^{-9} \cdot 12 \\ &= 12,9 \cdot 10^{-6} \text{ J} \quad (J; V, I, s, s, C, V) \end{aligned}$$

Kde  $U_d$  je jmenovité napětí  $I_d$  je jmenovitý proud,  $t_r$  je ideální doba nárůstu proudu,  $t_f$  je ideální doba poklesu proudu,  $Q_{rr}$  Reverse Recovery charge (zotavovací ztráta).

**Ztráta energie při vypínání  $E_{OFF}$ :**

$$E_{off} = U_{dc} \cdot I_d \cdot \left( \frac{t_r + t_f}{2} \right) = 12 \cdot 15 \cdot \left( \frac{(35 + 35) \cdot 10^{-9}}{2} \right) = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ J} \quad (J; V, I, s, s)$$

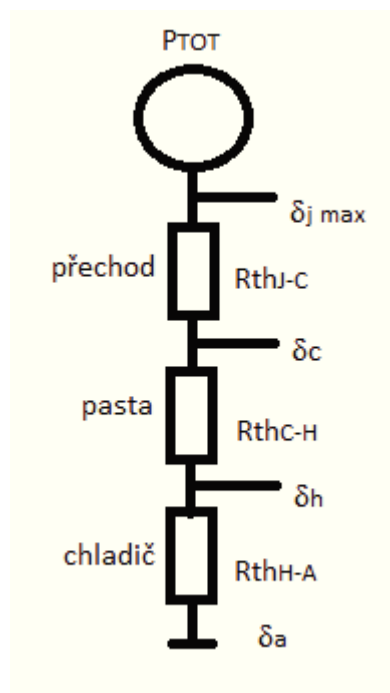
### Ztráta na hlavním proudovém obvodu součástky $P_{ce}$ :

$$P_{CE} = R_{DS(on)} \cdot I_a^2 = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 15^2 = 9,9 \text{ W} \quad (W; \Omega, A)$$

Kde  $R_{DS(on)}$  static drain-to-source On-Resistance (odpor součástky)

Celková ztráta polovodičové součástky má hodnotu 9,9 W. Pro navržení při 120 % přetížení je dále uvažováno jako celková ztráta 12 W.

### Chlazení tranzistoru



Tabulka 2 : hodnoty teplot a tepelných odporů a jejich popis

$\delta_{j \max}$	-maximální teplota	[°C]	150
$R_{thj-c}$	-tepelný odpor mezi přechodem a základnou součástky	[K/W]	1,15
$\delta_c$	-teplota základny součástky	[°C]	
$R_{thc-h}$	-tepelný odpor mezi základnou a chladičem	[K/W]	0,5
$\delta_h$	-teplota chladiče	[°C]	130,2
$R_{thh-a}$	<b>-tepelný odpor chladiče</b>	<b>[K/W]</b>	<b>8,35</b>
$\delta_a$	-teplota okolí	[°C]	30

Obrázek 24 Struktura chlazení

### Výpočet přechodů $\delta_{j-H}$ , $\delta_{H-A}$ , teploty chladiče $\delta_h$ , tepelného odporu chladiče $R_{thH-A}$ :

#### Přechod $\delta_{j-H}$ :

$$\delta_{j-H} = (R_{thj-c} + R_{thc-h}) \cdot P_{TOT} = (1,15 + 0,5) \cdot 12 = 19,8 \text{ °C} \quad (°C; K/W, K/W, W)$$

#### Teplota chladiče $\delta_h$ :

$$\delta_h = \delta_{jmax} - \delta_{j-H} = 150 - 19,8 = 130,2 \text{ °C} \quad (°C; °C, °C)$$

#### Přechod $\delta_{H-A}$

$$\delta_{H-A} = \delta_h - \delta_a = 130,2 - 30 = 100,2 \text{ °C} \quad (°C; °C, °C)$$



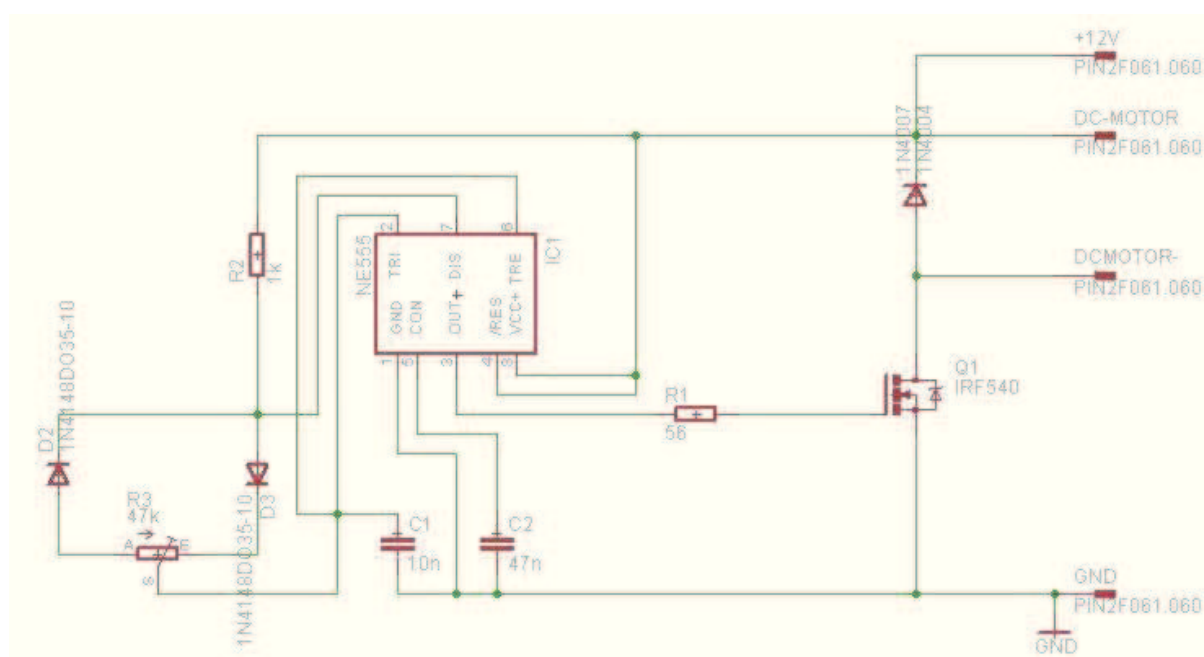
**Tepelný odpor chlaíče RthH-A:**

$$R_{th_{H-A}} = \frac{\delta_{H-A}}{P_{TOT}} = \frac{100,2}{12} = 8,35 \text{ K/W} \quad (\text{K/W}; ^\circ\text{C}, \text{W})$$

Tepelný odpor vyšel tedy 8,35 K/W pro tuto hodnotu je vybrán odpovídající chladič.

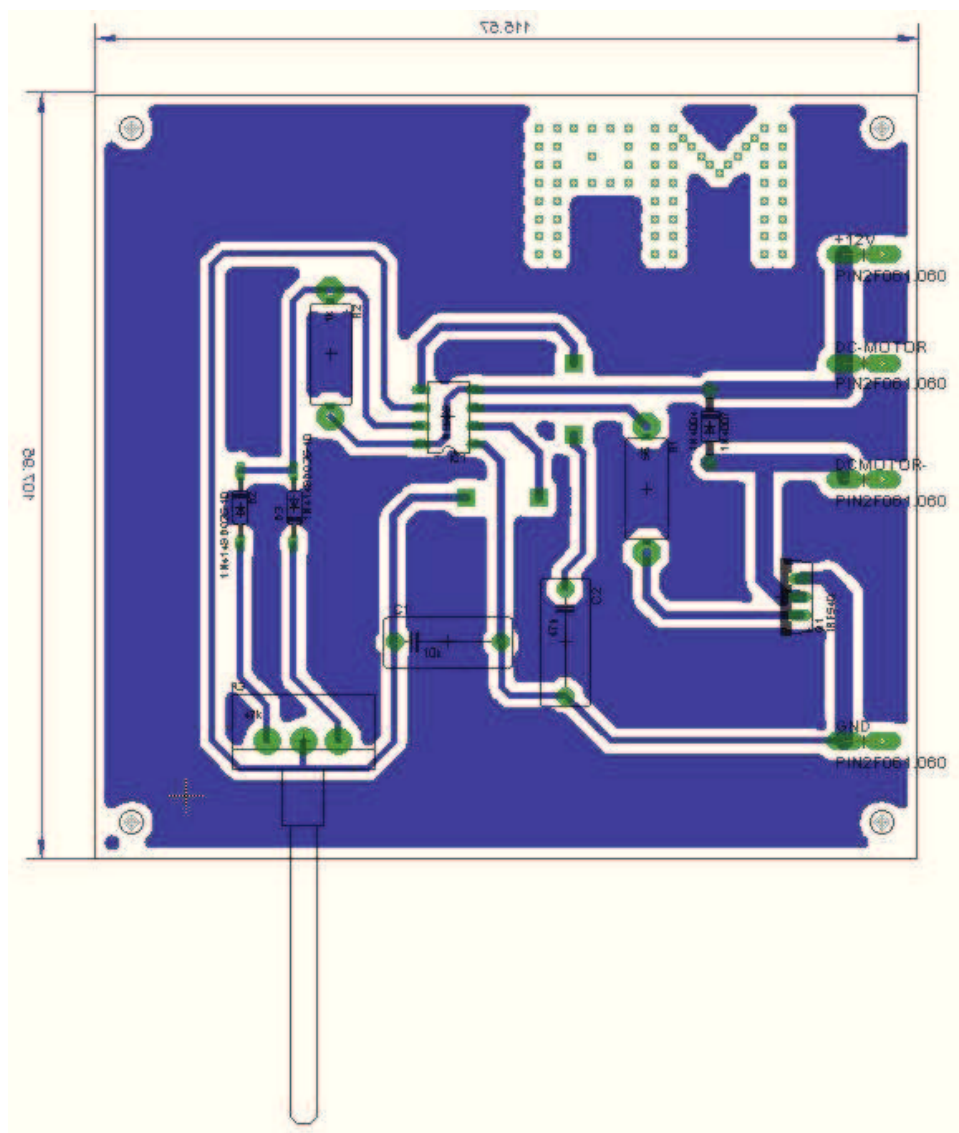
## 5.2 Realizace desky plošných spojů v Eaglu

Schéma zapojení měniče



Obrázek 25 Zapojení měniče

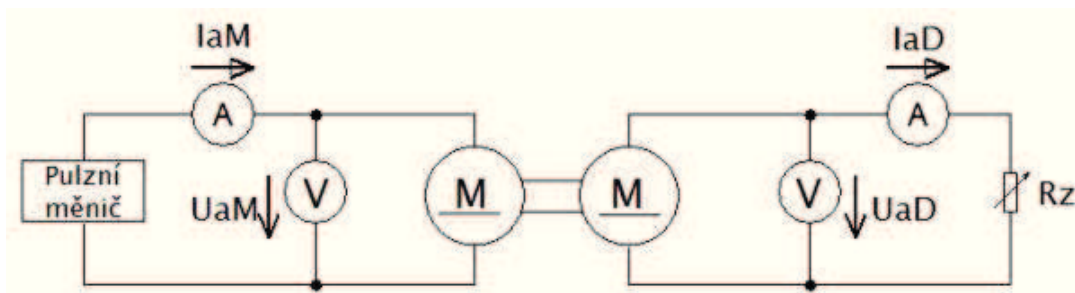
Deska byla vyrobena pomocí fotosenzitivní technologie v laboratoři školy a následně ručně osazena. Plošný spoj má sílu mědi CU 1x35  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 26 Deska plošného spoje pulzního měniče

## 6 Měření na pohonu

Zkompletovaný pohon bude sloužit jako laboratorní stanoviště pro měření zatěžovacích charakteristik. V následující části jsou uvedeny výsledky naměřených hodnot. Z těchto hodnot jsou numericky dopočteny stěžejní veličiny pro grafické vynesení zatěžovacích charakteristik pohonu. Nejprve byl celý pohon změřen naprázdno a graficky vynesena graf otáček v závislosti na střídě měniče. Dalším krokem bylo připojení elektrické zátěže na svorky hnaného motoru. Posledním krokem je měření při odporové zátěži. Pro každou hodnotu byl spočten moment motoru  $M_m$  a graficky vyneseny mechanické charakteristiky.



Obrázek 27 blokové schéma zapojení pro měření

Kde  $U_{aM}$  je napětí kotvy,  $I_{aM}$  je proud kotvy,  $U_{aD}$  je napětí na zátěži,  $I_{aD}$  je proud na zátěži,  $R_z$  je zátěž.

## 6.1 Měření naprázdno

Při tomto měření není na hnacím motoru připojena žádná zátěž,  $R_z$  je tedy odpojeno. Plynule se měnila střída měniče v rozsahu 0 až po sepnutí tranzistoru, tedy střidu 100%. Jak již bylo zmíněno, otáčky měříme pomocí tachodynamu.

### Tachodynamo

Na výstupu tachodynamu se indukují stejnosměrné napětí, které je následně podle vzorce přepočítáno na  $ot \cdot min^{-1}$ .

Jmenovité hodnoty tachodynamu:

- maximální otáčky  $6000 \text{ ot} \cdot min^{-1}$
- 20 V odpovídá  $1000 \text{ ot} \cdot min^{-1}$

Vzorec pro výpočet otáček:

$$n = 1000 \cdot \frac{U_t}{20} \quad (\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}; V)$$

Kde  $n$  jsou otáčky za minutu, a  $U_t$  je naindukované napětí tachodynamu.

Pro všechna měření byli použity následující přístroje a prvky:

Tabulka 3 : použité měřicí přístroje a prvky

Mesit stabilizovaný zdroj NN YE-2T 10A max
Agilent Technologies Oscilloscope MSO6054A
multimetr ESCORT 179
multimetr RANGE RE30 F
multimetr MASTECH MY64 (tachodynamo)
kleště SE-02 AC/DC CLAMP METER
zátěž elektrická Unitra TP-K162
odporová 6,3A 13ohm max 500V

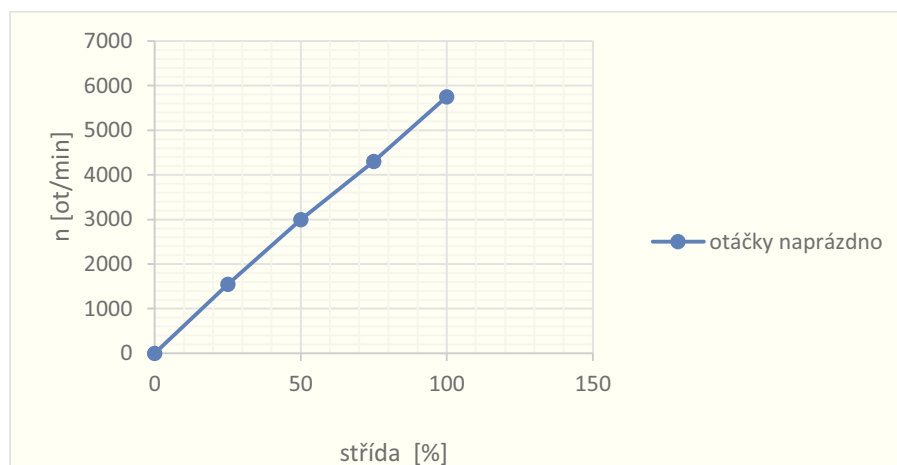
Tabulka 4 : naměřené a spočtené hodnoty

$U_z$ (V)	střída (%)	$U_a$ (V)	$I_a$ (A)	$U_{aD}$ (V)	$I_{aD}$ (A)	$U_{aD}$ (V)	$n_m$ (ot/min)	$M_m$ (mNm)
12	0	0	0	0	0	0	0	0
12	25	2	1,6	1,1	0	20	1550	37
12	50	5,8	2,3	4,6	0	52	3000	53
12	75	9,5	2,5	8,5	0	83	4300	59
12	100	12	3,3	11,3	0	115	5750	66

Příklad výpočtu otáček tachodynamy:

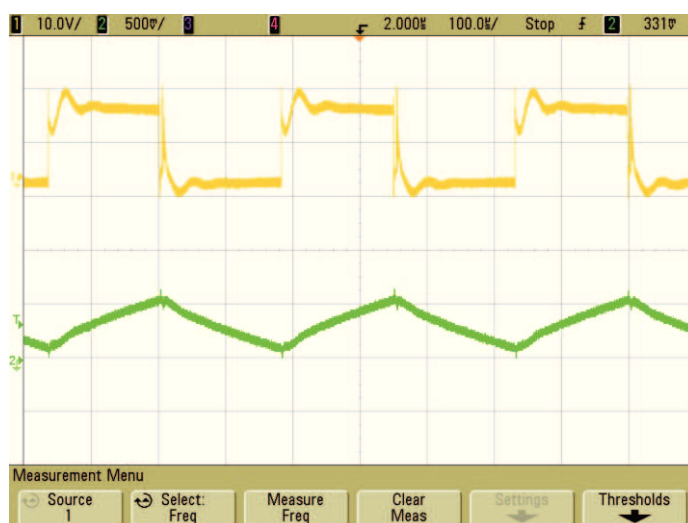
$$n = 1000 \cdot \frac{U_t}{20} = 1000 \cdot \frac{115}{20} = 5750 \text{ ot} \cdot \text{m}^{-1} \quad (\text{ot} \cdot \text{m}^{-1}; V)$$

### Graf průběhu otáček naprázdno



Obrázek 28 průběh otáček naprázdno

Z grafu je patrné, že při zvyšování střídý měniče otáčky lineárně narůstají až po hodnotu  $5750 \text{ ot} \cdot \text{m}^{-1}$ .



Obrázek 29 průběh proudu a napětí pro hodnotu střídý 50 %

## 6.2 Měření při připojení elektrické zátěže

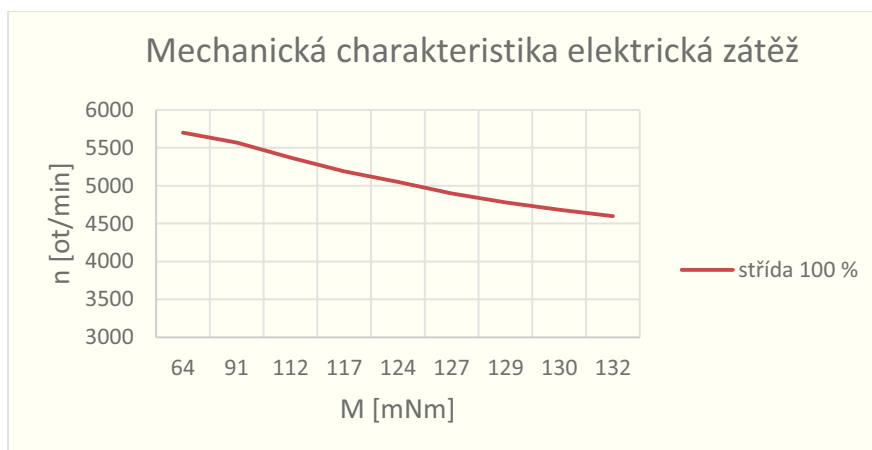
Měření bylo provedeno pro hodnotu střídavy 100%.

**Naměřené hodnoty:**

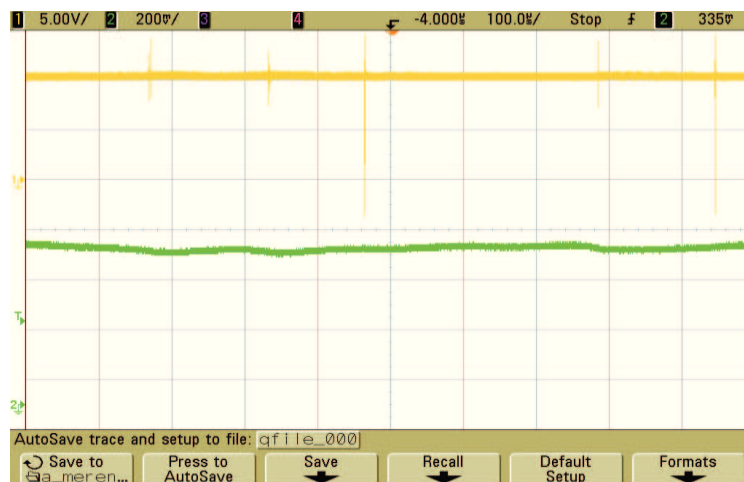
Tabulka 5 : naměřené hodnoty pro elektrickou zátěž při střídě 100%

$U_z$ (V)	střída (%)	$U_a$ (V)	$I_a$ (A)	$U_{aD}$ (V)	$I_{aD}$ (A)	$U_{aD}$ (V)	$n_m$ (ot/min)	$M_m$ (mNm)
12	100	12,3	2,74	11,2	0,94	114	5700	64
12	100	12	3,9	9	2	111,2	5570	91
12	100	11,7	4,77	8,25	3,14	107	5370	112
12	100	11,5	5	8	3,51	104	5190	117
12	100	11,3	5,29	7,6	3,7	101	5050	124
12	100	11	5,43	7,23	3,92	98	4900	127
12	100	10,84	5,5	7	4,07	95,7	4780	129
12	100	10,52	5,55	6,57	4,19	93,7	4685	130
12	100	10,42	5,65	6,47	4,13	92	4600	132

**Mechanická charakteristika:**



Obrázek 30 Mechanická charakteristika pro elektrickou zátěž při sepnutém stavu



Obrázek 31 průběh proudu a napětí v sepnutém stavu při momentu 132 mNm

### 6.3 Měření při připojení odporové zátěže

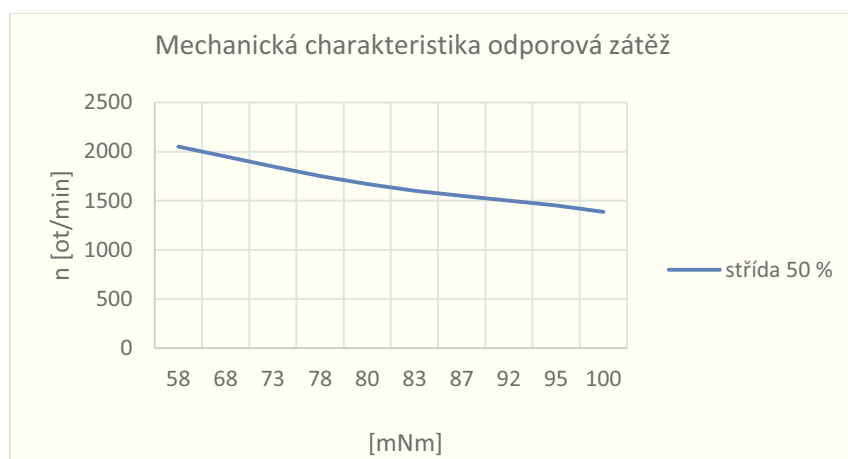
Hodnota střídý 50 %

Naměřené hodnoty:

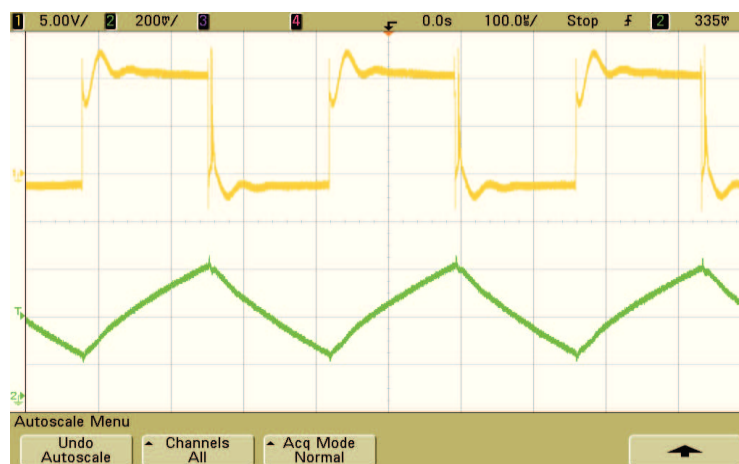
Tabulka 6 : naměřené hodnoty pro odporovou zátěž při střídě 50 %

$U_z$ (V)	střída (%)	$U_a$ (V)	$I_a$ (A)	$U_{aD}$ (V)	$I_{aD}$ (A)	$U_{aD}$ (V)	$n_m$ (ot/min)	$M_m$ (mNm)
12	50	5,2	2,51	3,18	1,13	41	2050	58
12	50	5	2,91	2,4	1,51	38,5	1950	68
12	50	4,95	3,1	2	1,7	36,5	1850	73
12	50	4,8	3,33	1,72	1,9	34	1750	78
12	50	4,82	3,44	1,52	2	33,2	1670	80
12	50	4,7	3,55	1,4	2,18	32	1600	83
12	50	4,65	3,73	1,2	2,35	31	1550	87
12	50	4,6	3,94	0,97	2,65	30	1500	92
12	50	4,5	3,98	0,72	2,71	29	1450	95
12	50	4,4	4,27	0,47	3,06	27,7	1385	100

**Mechanická charakteristika:**



Obrázek 32 mechanická charakteristika pro odporovou zátěž při střídě 50 %



Obrázek 33 Průběhy proudu a napětí pro hodnotu střídý 50 % při momentu 100 mNm

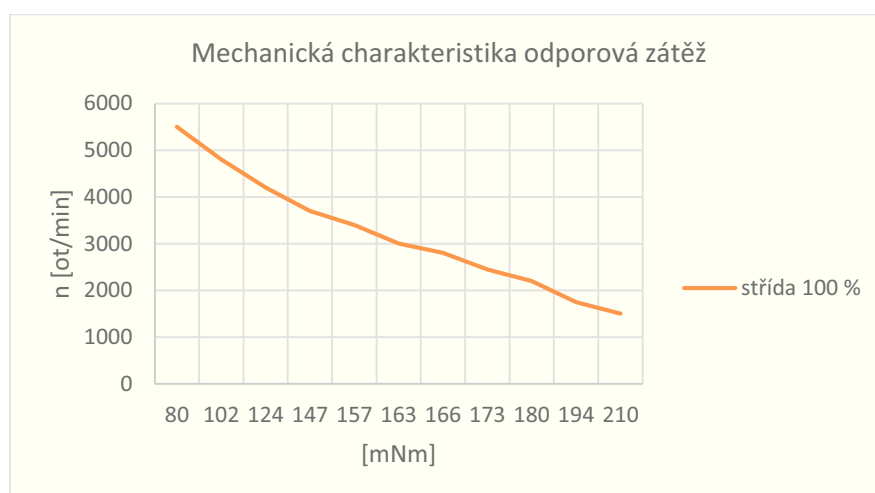
## Hodnota střídý 100 %

### Naměřené hodnoty:

Tabulka 7 : naměřené hodnoty pro odporovou zátěž při střídě 100 %

$U_z$ (V)	střída (%)	$U_a$ (V)	$I_a$ (A)	$U_{aD}$ (V)	$I_{aD}$ (A)	$U_{aD}$ (V)	$n_m$ (ot/min)	$M_m$ (mNm)
12	100	12	3,42	9	1,65	108	5500	80
12	100	11,6	4,4	8,4	2,8	96	4800	102
12	100	11,3	5,3	7,5	3,7	84	4200	124
12	100	10,4	6,3	6,1	4,75	74	3700	147
12	100	9,5	6,7	5,6	5,1	68	3400	157
12	100	8,9	7	4,5	5,3	60	3000	163
12	100	8,1	7,1	3,5	5,4	56	2800	166
12	100	6,6	7,4	2	5,5	49	2450	173
12	100	6,2	7,7	1,1	5,75	44	2200	180
12	100	5,8	8,3	0,7	6	35	1750	194
12	100	4,5	9	0,4	6,6	30	1500	210

### Mechanická charakteristika:



Obrázek 34 mechanická charakteristika pro odporovou zátěž při střídě 100 %



Obrázek 35 Průběhy proudu a napětí v sepnutém stavu při momentu 210 mNm

## Závěr

Tato práce si kladla za cíl být přínosem pro názornou praktickou ukázkou možnosti řízení DC motoru s permanentními magnety napájeného jednokvadrantového pulzního měniče. V teoretické části byly rozebrány jednotlivé druhy elektromotorů. Následně se v práci poukazuje na problematiku řízení DC motorů s permanentními magnety. Je uveden zvolený způsob řízení těchto motorů. Teoreticky jsou rozebrány spínací prvky, které tvoří hlavní výkonovou část měniče. V praktické části byla celá řešená problematika nejprve nasimulována pomocí MATLAB SIMULINK, poté byly numericky vypočteny všechny potřebné parametry k vytvoření této simulace a následně zobrazeny všechny výsledky. Při návrhu mechanického uchopení motorů byl dbán důraz na stabilitu celého pohonu. Pro navržení pulzního měniče se kladl důraz na výkonovou část z hlediska proudové zatížitelnosti desky plošného spoje. Dalším důležitým faktorem bylo navržení odpovídajícího chladiče pro výkonový spínací tranzistor. Na navrženém pohonu bylo provedeno měření. Nejprve bylo provedeno měření bez připojené zátěže na svorkách zatěžovacího motoru. Z těchto naměřených hodnot byl vynesena graf v závislosti otáček na střídě měniče. Při následovném měření byla na svorky zatěžovacího motoru připojena elektrická zátěž pro hodnotu střídě pulzního měniče 100 %. V posledním případě byla na svorky zatěžovacího motoru připojena odporová zátěž. Hodnota střídě pulzního měniče byla nastavena na 50 a 100 %. Z těchto naměřených hodnot byly pro všechna měření vyneseny mechanické charakteristiky. Největší zátěžný moment nastal při připojení odporové zátěže pro hodnotu střídě 100 %. Jeho velikost byla 210 mNm. Při této hodnotě došlo k maximálnímu proudovému omezení napájecího zdroje pohonu, který je omezen na 10 A. Při použití napájecího zdroje s větším proudovým omezením je tedy možné pohon více zatížit. Numericky vypočtený maximální moment motoru je 351 mNm. Sestavený pohon bude sloužit jako laboratorní úloha. Z naměřených hodnot byl vypracován vzorový protokol.



## Literatura

1. Uchytíl, Filip. *Návrh efektivního výkonového regulátoru otáček 3-fázového motoru*. Brno : Bakalářská práce , 2010. VUT Brno - fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií - Ústav telekomunikací.
2. Střídavé elektromotory. [www.skola.hellebrand.cz](http://www.skola.hellebrand.cz/text0910/ele/motory_str.pdf). [Online] [Citace: 18. 2 2013.] [http://skola.hellebrand.cz/text0910/ele/motory\\_str.pdf](http://skola.hellebrand.cz/text0910/ele/motory_str.pdf).
3. Kocman, Stanislav. Asynchronní stroje. [www.p.kobrlle.sweb.cz](http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf). [Online] 2002. [Citace: 20. 2 2013.] <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>.
4. Asynchronní motor. [www.ctiautomation.net](http://www.ctiautomation.net/About-Motors.htm). [Online] 2011. [Citace: 20. 2 2013.] <http://www.ctiautomation.net/About-Motors.htm>.
5. Bitenc, Marjan. Connections of three-phase asynchronous motors. [www.tiba.si/](http://www.tiba.si/en/clanki/priklopi-trifaznih-asinhronskih-motorjev.html). [Online] [Citace: 20. 2 2013.] <http://www.tiba.si/en/clanki/priklopi-trifaznih-asinhronskih-motorjev.html>.
6. Asynchronní motor s kotvou nakrátko. [www.elektrika.cz](http://elektrika.cz/data/clanky/asmot990607/view?searchterm=asynchronn%C3%AD%20motor). [Online] 7. 6 1999. [Citace: 20. 2 2013.] <http://elektrika.cz/data/clanky/asmot990607/view?searchterm=asynchronn%C3%AD%20motor>.
7. Elektrické stroje. [www.oklzed.sweb.cz](http://oklzed.sweb.cz/s/el_generator.htm). [Online] 2004. [Citace: 20. 2 2013.] [http://oklzed.sweb.cz/s/el\\_generator.htm](http://oklzed.sweb.cz/s/el_generator.htm).
8. Nepokoj, Lukáš. Momentová charakteristika asynchronního motoru s kotvou nakrátko. [Online] 1 2012. [Citace: 4. 3 2013.] [http://media1.webgarden.name/files/media1:51265f9b640d2.pptx.upl/VY\\_32\\_INOVACE\\_08\\_C\\_03\\_Momentov%C3%A1%20charakteristika%20asynchronn%C3%ADho%20motoru%20s%20kouvou%20nakr%C3%A1tko.pptx..](http://media1.webgarden.name/files/media1:51265f9b640d2.pptx.upl/VY_32_INOVACE_08_C_03_Momentov%C3%A1%20charakteristika%20asynchronn%C3%ADho%20motoru%20s%20kouvou%20nakr%C3%A1tko.pptx..)
9. Smílka, Jiří. Skripta elektrické stroje. [www.jsmilek.cz/](http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/esp%209%20asm%20skripta.pdf). [Online] 2005. [Citace: 21. 2 2013.] <http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/esp%209%20asm%20skripta.pdf>.
10. Neborák, Ivo. *Mechatronické systémy*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009.
11. VESELKA, F., VALOUCH, V. *Laboratore elektrických stroju a prístroju II – návody pro laboratorní měření. Skriptum VUT*. Brno : VUT, Brno, 2008. ISBN 978-80-7204-620-1.
12. stejnosměrné stroje. [vsb.cz/kat420.cz](http://feil.vsb.cz/kat420/.../syllab_stejnosmerne%20stroje_bc%20FS.pdf). [Online] [Citace: 21. 2 2013.] [http://feil.vsb.cz/kat420/.../syllab\\_stejnosmerne%20stroje\\_bc%20FS.pdf](http://feil.vsb.cz/kat420/.../syllab_stejnosmerne%20stroje_bc%20FS.pdf).
13. stejnosměrné motory. [www.fce.vutbr.cz](http://www.fce.vutbr.cz). [Online] [Citace: 25. 2 2013.] [www.lenze.com/cs-cz/vyroby/.../motory/derivacni-motor-mgfq/](http://www.lenze.com/cs-cz/vyroby/.../motory/derivacni-motor-mgfq/).
14. motorek ventilátoru topení. [www.automarg.cz](http://www.automarg.cz/dily/motorek-ventilatoru-topeni-xs-115972050/49916162/). [Online] automarg. [Citace: 25. 4 2013.] <http://www.automarg.cz/dily/motorek-ventilatoru-topeni-xs-115972050/49916162/>.
15. Princip Servo motoru. [www.pohonnatechnika.cz/](http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/servo-motor). [Online] pohonnatechnika, 2007-2013. [Citace: 25. 2 2013.] <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/servo-motor>.
16. Neborák, Ivo. *Modelování a simulace elektronických systémů*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006.

17. Skalický, Jiří. *Elektrické regulované pohony*. Brno : VUT Brno, 2007.
18. Pulzně šířková modulace - PWM. [www.352lab.vsb.cz/](http://www.352lab.vsb.cz/). [Online] [Citace: 25. 2 2013.] [http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Marek/pic-html/od5/od5\\_8.htm](http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Marek/pic-html/od5/od5_8.htm).
19. Pulzně šířková modulace. <http://cs.wikipedia.org/>. [Online] 10. 3 2013. [Citace: 25. 2 2013.] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B\\_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1\\_modulace](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace).
20. Pavel, Brandštetter. *Elektronika*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80 - 7078 - 966 - 2.
21. Petr, Chlebiš. *Výkonová Elektronika*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-TUO, 2007. CZ.04.01.33/3.2.15.2/0236.
22. —. *Výkonové polovodičové Systémy*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2005.
23. Leonard, Andy. charakteristika mosfetu . <http://sqlblog.com/>. [Online] 2006. [Citace: 2. 3 2013.] [http://sqlblog.com/blogs/andy\\_leonard/archive/2009/09/11/adventures-in-estimation.aspx](http://sqlblog.com/blogs/andy_leonard/archive/2009/09/11/adventures-in-estimation.aspx).
24. IGBT. [www.wikipedia.org/](http://www.wikipedia.org/). [Online] 12. 3 2013. [Citace: 4. 3 2013.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/IGBT>.
25. Petr, Vaculík. *Zdrojové struktury pohonných jednotek hybridních motorů*. Ostrava : Disertační práce, 2011. VŠB - Fakulta elektrotechniky a informatiky katedra elektroniky.
26. PWM regulátor. [ww.pokusy.chytrak.cz](http://ww.pokusy.chytrak.cz). [Online] [Citace: 18. 2 2013.] <http://pokusy.chytrak.cz/schemata/wmp.htm>.
27. Adam, Nehudek. Časovač 555. [www.kafelanka.cz](http://www.kafelanka.cz). [Online] 2010. [Citace: 25. 3 2013.] <http://adam.kafelanka.cz/index.php?id=13>.
28. *Všeobecná encyklopedie* . Praha : Diderot , 1999.
29. automag. <http://www.automarg.cz/>. [Online] Automarg.cz. [Citace: 30. 4 2013.] <http://www.automarg.cz/dily/motorek-ventilatoru-topeni-xs-115972050/49916162/>.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Asynchronní indukční motor (upraveno autorem) [4] .....	12
Obrázek 2 Zapojení AM do hvězdy a trojúhelníka [5] .....	13
Obrázek 3 Rotorová klec [7] .....	13
Obrázek 4 průběh momentu AM s kotvou na krátko [8] .....	14
Obrázek 5 momentová charakteristika synchronního motoru [10].....	16
Obrázek 6 Složení stejnosměrného motoru [11] .....	18
Obrázek 7 Ukázka použitého typu motoru pro konstrukci realizovaného pohonu [14].....	20
Obrázek 8 momentová charakteristika motoru s permanentními magnety [15] .....	21
Obrázek 9 Stejnosměrný motor s permanentními magnety (upraveno autorem) [15] .....	22
Obrázek 10 jednokvadrantový pulzní měnič s připojeným motorem (upraveno autorem) [16].....	23
Obrázek 11 průběhy PWM modulace vyjádřeny v % [18] .....	24
Obrázek 12 Struktura a princip bipolárního tranzistoru pro spínací aplikace [21] .....	26
Obrázek 13 výstupní voltampérová charakteristika v zapojení se společným emitorem [21] .....	26
Obrázek 14 Ukázka výstupní charakteristiky MOSFETU (upraveno autorem) (23) .....	28
Obrázek 15. průběhy veličin měniče při PWM modulaci [16] .....	29
Obrázek 16 model pulzního měniče.....	30
Obrázek 17 Průběhy $U_p$ a $U_a$ měniče .....	31
Obrázek 18 náhradní schéma DC motoru s cizím buzením [10] .....	32
Obrázek 19 matematický model DC motoru s permanentními magnety .....	35
Obrázek 20 Kompletní model nasimulovaného pohonu .....	35
Obrázek 21 průběhy na pohonu .....	36
Obrázek 22 obvodové schéma zapojení (upraveno autorem) [26].....	37
Obrázek 23 Vnitřní zapojení IO 555 a rozložení pinů (upraveno autorem) [27].....	38
Obrázek 24 Struktura chlazení.....	40
Obrázek 25 Zapojení měniče .....	41
Obrázek 26 Deska plošného spoje pulzního měniče.....	42
Obrázek 27 blokové schéma zapojení pro měření.....	43
Obrázek 28 průběh otáček naprázdno.....	44
Obrázek 29 průběh proudu a napětí pro hodnotu střídý 50 %.....	44
Obrázek 30 Mechanická charakteristika pro elektrickou zátěž při sepnutém stavu .....	45
Obrázek 31 průběh proudu a napětí v sepnutém stavu při momentu 132 mNm.....	45
Obrázek 32 mechanická charakteristika pro odporovou zátěž při střídě 50 % .....	46
Obrázek 33 Průběhy proudu a napětí pro hodnotu střídý 50 % při momentu 100 mNm.....	46
Obrázek 34 mechanická charakteristika pro odporovou zátěž při střídě 100 % .....	47
Obrázek 35 Průběhy proudu a napětí v sepnutém stavu při momentu 210 mNm.....	47

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 : seznam součástí.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 2 : hodnoty teplot a tepelných odporů a jejich popis.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 3 : použité měřicí přístroje a prvky.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 4 : naměřené a spočtené hodnoty.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 5 : naměřené hodnoty pro elektrickou zátěž při střídě 100%.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 6 : naměřené hodnoty pro odporovou zátěž při střídě 50 %.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 7 : naměřené hodnoty pro odporovou zátěž při střídě 100 %.....</i>	<i>47</i>

## Přílohy

*Příloha I : Vzorový protokol*